

VTT Technical Research Centre of Finland

Lähienergialla omavaraisuuteen

Raitila, Jyrki; Tsupari, Eemeli; Hurskainen, Markus

Published: 11/12/2018

Document Version
Publisher's final version

[Link to publication](#)

Please cite the original version:

Raitila, J., Tsupari, E., & Hurskainen, M. (2018). *Lähienergialla omavaraisuuteen: Polttoaineen kosteuden vaikutus hakekattilan toimintaan ja hakkeen aurinkokuivaus*. VTT Technical Research Centre of Finland. VTT Asiakasraportti No. VTT-CR-00413-18



VTT
<http://www.vtt.fi>
P.O. box 1000FI-02044 VTT
Finland

By using VTT's Research Information Portal you are bound by the following Terms & Conditions.

I have read and I understand the following statement:

This document is protected by copyright and other intellectual property rights, and duplication or sale of all or part of any of this document is not permitted, except duplication for research use or educational purposes in electronic or print form. You must obtain permission for any other use. Electronic or print copies may not be offered for sale.



Lähienergialla omavaraisuuteen: polttoaineen kosteuden vaikutus hakekattilan toimintaan ja hakkeen aurinkokuivaus

Kirjoittajat: Jyrki Raitila, Eemeli Tsupari, Markus Hurskainen

Luottamuksellisuus: Julkinen

Raportin nimi Lähienergialla omavaraisuuteen: polttokokeet ja hakkeen aurinkokuivaus		
Asiakkaan nimi, yhteyshenkilö ja yhteystiedot Suomen metsäkeskus, itäinen palvelualue Veli-Pekka Kauppinen Sivulantie 11, 43101 Saarijärvi		Asiakkaan viite
Projektin nimi Lähienergialla omavaraisuuteen		Projektin numero/lyhytnimi Lähienergia
Raportin laatija(t) Jyrki Raitila, Eemeli Tsupari, Markus Hurskainen		Sivujen/liitesivujen lukumäärä 48
Avainsanat Metsähake, hakkeen kuivaus, aurinkoenergia, pienpoltto		Raportin numero VTT-CR-00413-18
Tiivistelmä <p>Suomen metsäkeskuksen hallinnoiman Lähienergialla omavaraisuuteen -hankkeen keskeisimpänä tavoitteena oli selvittää mahdollisuudet energian omavaraisuuteen alueellisessa yhteisössä uusiutuvan energian avulla. Tarkastelukohteena oli lämpöyrittäjien ja maaseutumaisten kuntien energiantuotanto liikennepolttoaineita lukuun ottamatta. Tähän raporttiin on koottu VTT:n toimesta tehtyt ja VTT:n ohjaamat tutkimukset ja niiden keskeiset tulokset. Nämä kohdentuivat pääasiassa kahteen alueeseen. Polttokokeiden avulla tutkittiin hakkeen kosteuden vaikutusta 500 kW arinakattilan savukaasupäästöihin ja hyötysuhteeseen. VTT:n aurinkokuivausjärjestelmän avulla tutkittiin aurinkoenergian hyödyntämistä hakkeen kuivauksessa.</p> <p>Polttokokeet osoittivat, että kattilan oikeat säädöt, tasainen polttoaineen syöttö ja ohjauslogiikka ovat avainasemassa hyvän polttotuloksen saavuttamisessa. Tutkitulla kattilalla osateholla ajettaessa hakkeen kosteus lisäsi merkittävästi häkä- ja hiukkaspäästöjä hakkeen kosteuden ylitettyä 45 p-%.</p> <p>Aurinkolämmön hyödyntämistä hakkeen kuivaamisessa rajoittavat eniten suuret investointikustannukset ja suhteellisen lyhyt vuotuinen hyödyntämisaika. Aurinkokeräinjärjestelmien kustannukset ovat kuitenkin jatkuvasti laskeneet ja tietyin edellytyksin niiden hyödyntäminen biomassan kuivauksessa on jo nyt kannattavaa. Tämä edellyttää kuitenkin parempaa myyntihintaa kuivatulle tuotteelle, parempaa hyötysuhdetta kuin koelaitteilla ja investointitukia.</p>		
Luottamuksellisuus	Julkinen	
Jyväskylä 11.12.2018 Laatija	Tarkastaja	Hyväksyjä
Jyrki Raitila, Erikoistutkija	Jouni Hämäläinen, Tutkimustiimin päällikkö	Tuulamari Helaja, Tutkimusalueen johtaja
VTT:n yhteystiedot Koivurannantie 1, PL 40401 Jyväskylä		
Jakelu (asiakkaat ja VTT) Suomen metsäkeskus, hankkeen ohjausryhmä ja VTT		
VTT:n nimen käyttäminen mainonnassa tai tämän raportin osittainen julkaiseminen on sallittu vain Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy:ltä saadun kirjallisen luvan perusteella.		

Alkusanat

Tämä tutkimus tehtiin VTT:n Jyväskylän toimipisteessä vuosina 2016-2018 osana Suomen metsäkeskuksen 'Lähienergialla omavaraisuuteen' yhteistyöhanketta. Metsäkeskus tilasi työn asiakastoimeksiantona kuitenkin niin, että tulokset ovat julkisia. VTT:llä työtä johti erikoistutkija Jyrki Raitila. Hän toimi myös ohjausryhmässä kutsuttuna asiantuntijana. Aurinkoenergiaan liittyvistä laskennoista vastasi Eemeli Tsupari. Markus Hurskainen analysoi JAMK:ilta saadun polttokoeaineiston ja kokosi siitä yhteenvedon. JAMK:in polttokokeiden toteutuksesta ja datan keruusta vastasi Kimmo Puolamäki Biotalousinstituutin kattilatestauslaboratoriosta.

Lähienergialla omavaraisuuteen yhteistyöhanketta rahoitti pääasiassa Maaseuturahasto ja sitä hallinnoi Suomen metsäkeskus. Hankkeen muut toteuttajaosapuolet olivat Jyväskylän ammattikorkeakoulu ja Pohjoisen Keski-Suomen oppimiskeskus sekä Keski-Suomen energiatoimisto/Benet Oy. Hankkeen koordinaattorina toimi Veli-Pekka Kauppinen Suomen metsäkeskuksesta. Ohjausryhmään kuuluivat Marko Valkonen Oravasaaren kyläyhdistyksestä (puheenjohtaja), Kalle Hankamäki MTK:sta, Veli Koski ELY-keskuksesta, Pekka Janhonen Poke:sta, Asko Ojaniemi Benet Oy:stä, Hannariina Honkanen JAMK:ista sekä Veli-Pekka Kauppinen (sihteeri) ja Seija Tiitinen-Salmela metsäkeskuksesta.

Kiitämme erinomaisesta yhteistyöstä kaikkia hankkeen toteuttajia, rahoittajia ja ohjausryhmän jäseniä.

Jyväskylä 11.12.2018

Tekijät

Sisällysluettelo

Alkusanat	2
Sisällysluettelo.....	3
1. Johdanto.....	4
2. Tavoite.....	5
2.1 Hankkeen yleiset tavoitteet	5
2.1 Tutkimuksen tavoitteet.....	6
3. Rankahakkeen polttotutkimus	7
3.1 Taustaa	7
3.2 Koelaitteet ja -järjestelyt.....	7
3.3 Polttokokeiden tavoitteet ja toteutus.....	8
3.4 Polttokokeiden tulokset.....	10
4. Aurinkokeräimen hyödyntäminen kuivauksessa	20
4.1 Yleistä kuivauksesta	20
4.2 Aurinkoenergian potentiaali kuivauksessa	22
4.3 Koelaitteet ja -järjestelyt.....	23
4.4 Tutkimusmenetelmät ja kohteen rajaus.....	27
4.4.1 Kuivausjärjestelyt.....	27
4.4.2 Puhaltimen ohjausalgoritmit.....	28
4.4.3 Mittaukset ja laskentaperusteet.....	32
4.5 Kuivauskokeiden tulokset	34
5. Lämpölaitoksen kesäajan lämmöntuotanto	41
5.1 Nykyinen lämmöntuotanto	41
5.2 Lämmöntuotanto lämpöpumpuilla tai aurinkokeräimillä	41
6. Yhteenveto ja johtopäätökset.....	43
6.1 Rankahakkeen polttotutkimus	43
6.2 Kuivaus aurinkolämmön avulla	44
6.3 Lämpölaitoksen kesäajan lämmöntuotanto	45
Lähdeviitteet.....	47

1. Johdanto

Työ- ja elinkeinoministeriön vuonna 2013 julkaisemassa kansallisessa energia- ja ilmastostrategiassa uusiutuvan energian tavoitteeksi on asetettu 38 % osuus loppukulutuksesta vuoteen 2020 mennessä. Energiantuotannossa fossiilisen öljyn vähentämistavoitteeksi on asetettu 17 % kokonaisenergiantuotannosta vuoteen 2025 mennessä. Strategian päätavoitteena on päästä hiilineutraaliin yhteiskuntaan.

Suomen metsäkeskus käynnisti vuonna 2016 maakunnallisen hankkeen (Lähienenergialla omavaraisuuteen yhteistyöhanke 2016-19) Keski-Suomessa tukemaan alueellista energiaomavaraisuutta käyttäen uusiutuvia energialähteitä. Samalla se palveli omalta osaltaan kansallisen strategian tavoitteita ja tulosten toteutumista.

Useimmissa Keski-Suomen taajamissa on bioenergiaa tuottavat kaukolämpölaitokset. Yhdistetty sähkön- ja lämmöntuotanto on käytössä vain muutamissa isoimmissa kunnissa. Sähköntuotanto on nykyään mahdollista toteuttaa teknisesti ja taloudellisesti myös pienemmissä aluelämpölaitoksissa, jos investointi tehdään lämmityslaitteiden uudistamistarpeen yhteydessä. Investointitarve tulee yleensä biolaitteiden vanhenemisen tai lämmitysverkoston laajenemisen vuoksi. Keski-Suomessa ei ole aiemmin selvitetty toimivien lämpölaitosten elinkaarta ja uudistamistarvetta. Elinkaaritarkastelun yhteydessä selvitettiin, onko yhdistetty lämmön- ja sähköntuotanto taajamien lämpölaitoksissa nykyään taloudellisesti kannattavaa.

Lämmön- ja sähköntuotannon huoltovarmuuteen vaikuttavat bioenergian tuottajien kuten lämpö-, kone- ja hakeyrittäjien liiketoiminnan taloudellinen kannattavuus. Tämä vaikuttaa myös alan imagoon sekä nuorten ja uusien yrittäjien saamiseen bioenergia-alalle. Yrittäjien liiketoiminnan neuvonnalla ja tiedotuksella voidaan varmistaa tarvittavat työresurssit myös tulevaisuudessa.

Suomen metsäkeskus on eri puolella Suomea toteuttanut puuenergiaan liittyviä hankkeita, ja niiden tuloksia hyödynnettiin myös tässä hankkeissa. Pohjanmaan ”Kestävä metsäenergia”-hankkeessa tutkittiin klapin ja hakkeen asfalttikuiuusta. Näitä tuloksia esiteltiin myös Keski-Suomen hankkeen yrittäjäpäivissä. Muita hankkeita ovat mm: ”Biomass2” ja ”Moteista Megawateiksi Pirkanmaalla” hankkeet keskittyivät bioenergiayrittäjien ja asiakkaiden kohtaamisen ”pullonkaulojen” selvittämiseen ja poistamiseen. Keski-Suomen alueella hankkeessa ”Biolämpöliiketoiminnan laatu- ja kannattavuus”, on tutkittu puupolttoaineiden laadun vaikutusta lämpöyrittäjän kannattavuuteen. Hankkeessa selvitettiin, miten energiantuottajat ja -kuluttajat hyötävät polttoaineen paremmasta laadusta taloudellisessa toiminnassaan. Edellisissä hankkeissa yrittäjät ovat tuoneet esille tutkittavia teemoja, kuten lämpölaitosten kesäajan käyttö, miten märkää polttoainetta voisi priimata ja milloin

sähköntuotanto olisi kannattavaa yrittäjille ja kuluttajille. Muun muassa näihin tärkeisiin kysymyksiin pyrittiin hankkeessa löytämään ratkaisuja.

Tähän raporttiin on koottu VTT:n toimesta tehdyt ja VTT:n ohjaamat tutkimukset ja niiden keskeiset tulokset.

2. Tavoite

2.1 Hankkeen yleiset tavoitteet

Hankkeen lähtökohtana oli maakunnan energiahuoltovarmuuden turvaaminen ja energiaomavaraisuuden parantaminen hyödyntäen paikallisia energialähteitä. Yleisenä tavoitteena oli edistää tehokkaan ja ympäristöystävällisen teknologian käyttöönottoa, parantaa energialiiketoiminnan kannattavuutta sekä vähentää energiantuotannosta koituvia päästöjä. Nämä ovat selkeästi ja monin tavoin yhteydessä toisiinsa. Esimerkiksi laadukkaan polttoaineen käyttö vähentää päästöjä ja tarvittavan polttoaineen määrää sekä säästää huolto- ja korjauskustannuksissa. Lisäksi lämpölaitoksella voitaisiin kesäaikaan tuottaa energiaa vaihtoehtoisella teknologialla. Tämä osaltaan edelleen vähentäisi päästöjä ja lisäisi toiminnan kannattavuutta, mikäli lämpölaitoksen ei tarvitsisi käyttää biokattilaa liian pienellä teholla tai polttaa öljyä.

Hankkeen keskeisimpänä tavoitteena oli selvittää mahdollisuudet energiaomavaraisuuteen alueellisissa yhteisöissä uusiutuvan energian avulla. Tarkastelukohteena oli lämpöyrittäjien ja maaseutumaisten kuntien energiantuotanto liikennepolttoaineita lukuun ottamatta. Pääasiallisena energialähteenä nähtiin puuperäiset polttoaineet. Hankkeessa demonstroitui aurinkoenergian hyödyntämistä puupolttoaineen kuivaukseen. Pienissä laitoksissa puupolttoaineilla tuotetaan yleensä vain lämpöä. Kansallisessa energia- ja ilmastostrategiassa yhtenä tavoitteena on kuitenkin edistää myös pienimuotoista sähköntuotantoa. Hankkeessa selvitettiin, miten olisi mahdollista tuottaa lämpöä ja sähköä myös pienten yhteisöjen omaan käyttöön kuten asutusalueille, maatiloille ja teollisuuskiinteistöille. Maaseudulla sähkön jakeluun aiheuttavat ongelmia tuulen ja lumen aiheuttamat sähkökatkokset. Hajautetulla sähköntuotannolla saadaan parannettua maaseudun omavaraisuutta ja elinvoimaisuutta. Samalla saadaan lähellä olevat energialähteet hyödynnettyä mahdollisimman hyvin.

Jotta päästään huoltovarmuuteen, tarvitaan lisää tiedotusta ja neuvontaa uusista teknologisista mahdollisuuksista, kannattavuudesta sekä uusista toimintamalleista. Siksi tällä hankkeella haluttiin tavoittaa lähien energian tuottajia ja käyttäjiä tarjoamalla monipuolista tietoa esimerkiksi puhtaan polton teknologisista ratkaisuista, polttoaineiden käsittelystä, omavaraisuudesta ja uusista liiketoimintamahdollisuuksista. Hankkeen osatavoitteita olivat:

- Tuottaa energiaomavaraisen yhteisön toimintamalli, jolla energiaa pystytään siirtämään kannattavasti kiinteistöstä toiseen. Tarkasteluun valittiin muutama erilainen alue: 1. Pientalotalo- tai teollisuusalue, 2. kyläyhteisö, 3. kuntakeskus.
- Tuottaa ohjeaineistoa bio-, aurinko- ja sekä hybridiratkaisujen tehokkaasta hyödyntämisestä osana energiajärjestelmää (esimerkiksi yhdistetty aurinko- ja puulämmitys, hyötysuhteen nosto kesäajan käytössä, aurinkolämmön käyttö silloin, kun tehontarve alittaa biokattilan käytettävyyden alarajan.
- Puuperäisten polttoaineiden laadun parantamiseen lähien energialla (esim. puupolttoaineen kuivaaminen aurinkoenergiaa hyödyntämällä).

- Sähköntuotannon mahdollisuuksien selvittäminen pienessä mittakaavassa lämmöntuotannon ohessa esimerkiksi osuuskunnan käyttöön.
- Lisätä yhteisökäyttäjien tietoisuutta lähien energian mahdollisuuksista ja oikeasta käytöstä (esimerkiksi raaka-aineen laatu ja oikea polttotekniikka).
- Lisätä lähien energiantuottajien tarjoamien palvelujen laatu-tietoisuutta ja lisätä palveluvalikoimaa.
- Maaseutuyrittäjyyden monipuolistaminen, kannattavuuden ja toimintamahdollisuuksien parantaminen.
- Koota 2 – 3 yritysryhmähanketta yrityksiä kiinnostavista toimintamalleista.

2.1 Tutkimuksen tavoitteet

Hankkeessa tehdyn erillisen tutkimustyön, joka koskee hankesuunnitelman osiota 'Päästöjen hallinta ja kannattavuuden parantaminen nykyisissä lämpölaitoksissa' tavoitteet olivat seuraavat:

- Täydentää hankkeessa 'Biolämpöliiketoiminnan laatu- ja kannattavuushanke' saatujen polttokokeiden tuloksia (etenkin päästöt ja hyötysuhde) mäntyrankahakkeen polttokokeilla, kun puun kosteus on välillä 40-45 %. Verrataan kuivempien hakkeiden 25 % ja 35 % sekä kosteiden 50+ % hakkeiden tuloksia.
- Selvittää polttokokein, voiko kosteaa haketta priimata esim. pelletillä, siten että kattilan päästöt pysyvät uusimpien direktiivien rajoissa. Oletuksena on, että kuivalla hakkeella saadaan kattilasta parempi teho ja se toimii pienemmällä ylläpitotulella.
- Kokeiden perusteella ottaa kantaa, millaisilla polttoaineilla voidaan saavuttaa direktiiviin mukaiset päästöarvot vanhoilla kattiloilla.
- Selvittää, kannattaako hakelaitos sammuttaa kesäajaksi ja investoida esim. lämpöpumppuihin tai aurinkokeräimiin. Vertailuna on 1 MW kattilalaitos.
- Selvittää kuivauskokeiden avulla, miten aurinkoenergiaa voi ja kannattaa käyttää hyödyksi pienen kokoluokan biokuivurissa.
- Kuivauksen tehoalueen (min ja max) määrittäminen sekä kuivauksen hyötyjen arvottaminen.

3. Rankahakkeen polttotutkimus

3.1 Taustaa

Vuosina 2012–2014 Suomen metsäkeskus hallinnoi ja johti maakunnallista hanketta Keski-Suomessa nimeltä 'Biolämpöliiketoiminnan laatu- ja kannattavuushanke'. Projektissa haluttiin muun muassa selvittää hakkeen kosteuden vaikutusta pienten aluelämpölaitosten kattiloiden toimintaan. Asian selvittämiseksi Jyväskylän ammattikorkeakoulun Biotalousinstituutin 500 kW:n koekattilalla suoritettiin polttokokeita erilaisilla koko- ja runkopuuhaakeilla. VTT ohjasi kokeita ja teki tuloksista yhteenvetoraportin.

Kyseisessä polttokoesarjassa käytettyjen hakkeiden kosteudet olivat noin 20, 35 ja 50 %. Tällöin tuloksista todettiin, että hakkeen kosteuden muutos 20:sta 35:en prosenttiin ei vaikuta merkittävästi kattilan toimintaan ja päästöihin, kun taas kosteuden muutos edelleen 50 prosenttiin heikentää monella tavalla kattilan toimintaa ja lisää päästöjä. Suurimmat muutokset kattilan toiminnassa näyttivät siis tapahtuvan, kun hakkeen kosteus kasvoi 35:stä prosentista 50:en. Tämän vuoksi tässä hankkeessa haluttiin polttokokein tutkia nimenomaan kosteusalueella 40–45 % olevia hakkeita. Lisäksi haluttiin selvittää, voidaanko puupellettien lisäämisellä parantaa märän (45–55 %) hakkeen palamista.

3.2 Koelaitteet ja -järjestelyt

Hakkeen polttokokeet tehtiin Jyväskylän ammattikorkeakoulun Biotalousinstituutin kattilatestauslaboratoriossa, missä voidaan testata, mitata ja tutkia kiinteiden energiabiomassojen polttoa, päästöjenhallintaa sekä energiatehokkuutta. Uusimmalla mittaus- ja säätötekniikalla varustetussa laboratoriossa on kolme testauspaikkaa. Kaksi erikoisvarusteltua polttoainekattilaa (40 ja 500 kW) mahdollistavat biopolttoaineiden testaamisen. Laboratorion piha-alueella voidaan lisäksi testata lämpökontteja. Kattilatestauslaboratoriossa voidaan tehdä mittauksia kolmella testauspaikalla. Mittauksia on mahdollista suorittaa kahdessa samanaikaisessa, osin porrastetussa testauksessa.

Näissä kokeissa käytetyn 500 kW:n bioenergiakattilan ilmanjakoa ja arinan liikettä ja sen käyntiaikoja voidaan säätää halutuksi. Kattilassa on savukaasuanalysaattorit, joilla voidaan mitata savukaasun O₂-, CO₂-, CO-, NO-, NO_x¹, OGC² ja hiukkaspitoisuudet. Lämpötiloja mitataan tulipesästä, konvektio-osasta sekä kattilan meno- ja paluuviedestä. Kattilaveden virtaus mitataan myös ja sen ja meno- ja paluuvieden lämpötilojen perusteella lasketaan teho jatkuvatoimisesti. Kaikki mittaustiedot tallennetaan halutulla taajuudella tiedonkeruujärjestelmällä, esimerkiksi näissä kokeissa 5 sekunnin välein.

Bioenergiakeskuksen kattilatestauslaboratorion tilat ja laitteet on akkreditoitu VTT Expert Service Oy:n (FINAS T001 1.19) toiminnan piirissä ja testauksen voidaan tehdä virallisen EN 303-5 standardin mukaan kiinteiden polttoaineiden lämmityskattiloille. Akkreditoitu työ käsittää seuraavat asiat:

- Standardin EN-303-5 mukaista mittaustoimintaa alle 1 MW:n teholuokassa
- Lämpökonttien lyhytaikaista testausta 3 MW teholuokkaan asti
- Lämmityslaitteiden ja polttoaineiden käytettävyydestä testaukset
- Polttoaineiden kuivaus- ja käyttökokeet, ml. priimaus ja seospoltto
- Savukaasuanalyytit (lämpötila, O₂, CO₂, CO), kattilahyötysuhde ja tulosten tulkinta

¹ NO_x = typenoksidit

² OGC (organic gaseous carbon) = orgaaninen kaasumainen hiili



Kuva 1. Biotalousinstituutin kattilatestauslaboratorion 500 kW haketestauskattila.

3.3 Polttokokeiden tavoitteet ja toteutus

Lähtökohtana polttokokeille olivat hankkeen 'Biolämpöliiketoiminnan laatu ja kannattavuus' toteutus ja tulokset. Hakkeen polttokokeet tehtiin kattilatestausstandardin (EN303-5:2012) mukaisesti 500 kW kattilalla tehotasoilla 30 ja 100 % kuitenkin niin, että testiaika lyhennettiin kuudesta tunnista noin tuntiin. Polttoaineena käytettiin männystä tehtyä rankahaketta (Kuva 2, Taulukko 1) tavoitekosteuksissa 35, 40, 45 ja 55 %, jotta voitiin selvittää polttoaineen kosteuden vaikutuksia kattilan toimintaan. Hake kuivattiin biotalousinstituutin hakekuivurissa.

Lisäksi tutkittiin, kuinka puupellettien seostaminen määrän hakkeen sekaan vaikuttaa polttotuloksiin. Kokeissa pelletin (Vapo laatuluokka A1, Taulukko 1) seospolton vaikutusta tutkittiin poltettaessa haketta kosteuksissa 45 ja 55 %. Pelletti lisättiin erillisellä syöttimellä.

Taulukko 1. Kokeissa käytettyjen hakkeiden ominaisuuksia.

Analyysi	Arvo	Yksikkö	Menetelmä
Alkuperä: Runkopuu 1.1.3			SFS-EN ISO 17225-1:2014
Kauppanimike: Puuhake			SFS-EN ISO 17225-1:2014
Tehollinen lämpöarvo	19,05–19,14	MJ/kg k-a	SFS-EN 14918:2010
Tuhka	0,3–0,4	m-% k-a	SFS-EN 18122:2015, 550 °C
Irtotiheys, k-a (BD _a)	160,1–177,0	kg/m ³	SFS-EN 15103:2010

k-a = kuiva-aineessa, mitattu saapumistilassa



Kuva 2. Polttokokeissa käytettyä rankahaketta.

Taulukko 2. Kokeissa käytettyjen puupellettien (alkuperä 1.2.1) ominaisuudet.

Analyysi	Arvo	Yksikkö	Menetelmä
Kosteus, ar	7,7–9,7	m-%	SFS-EN ISO 18134-2:2015
Tehollinen lämpöarvo	18,76–19,54	MJ/kg k-a	SFS-EN 14918:2010
Tehollinen lämpöarvo, ar	17,13–17,42	MJ/kg	SFS-EN 14918:2010
Tuhka	0,3–0,4	m-% k-a	SFS-EN 18122:2015, 550 °C
Irtotiheys, ar	628,9	kg/m ³	SFS-EN 15103:2010

k-a = kuiva-aineessa, ar = saapumistilassa

Kokeissa määritettiin savukaasun koostumus sekä määritettiin kattilan hyötysuhde. Savukaasuista analysoitiin O₂-, CO₂-, CO-, NO_x- ja hiukkaspitoisuudet. Hiukkaspitoisuudet määritettiin gravimetrisesti. Tuhkan määrää ja koostumusta ei analysoitu.

Kokeissa kattilan säätöjä (ilmamäärät, ilmajako, arinan liike) haettaessa pyrittiin saavuttamaan tavoiteltu tehotaso sekä pitämään prosessi tasaisena ja häkäpäästöt kohtuullisissa rajoissa (<400 ppm). Käytettävissä olleilla resursseilla ei kuitenkaan ollut mahdollista hakea optimaalisimpia ajoparametreja joka kokeeseen.

Polttokoematriisi on esitetty taulukossa 3.

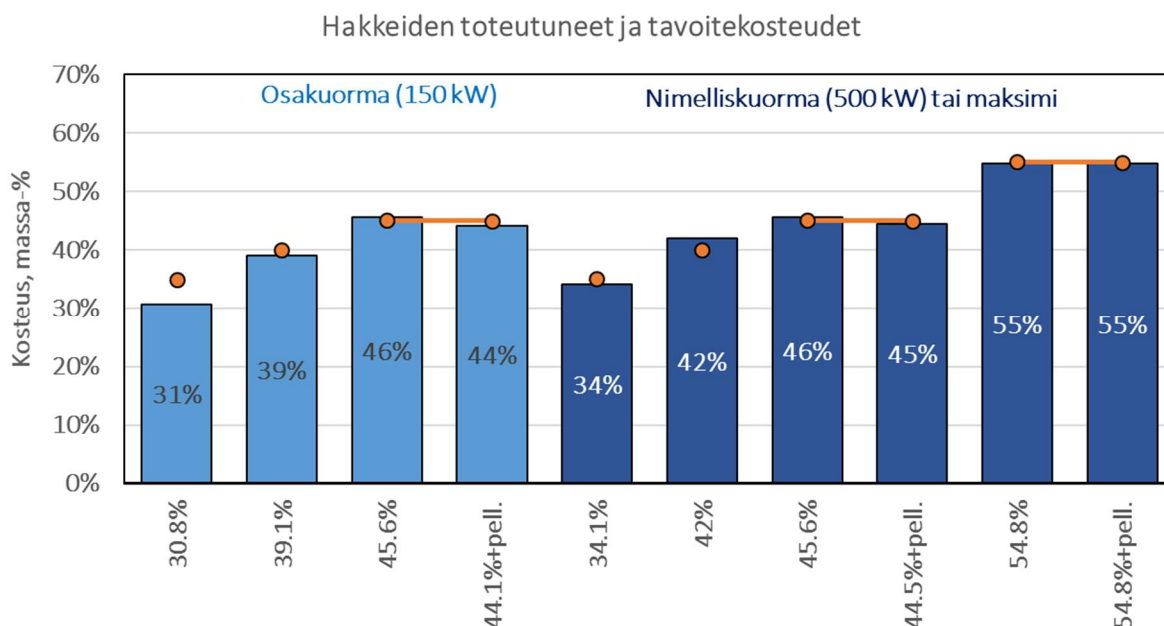
Taulukko 3. Biotalousinstituutin kattilatestauslaboratoriossa tehdyt polttokokeet.

Koe	Polttoaine	Hakkeen tavoitekosteus, %	Kattilan tavoitetehto, % nimellistehosta
1	Rankahake	35	100
2			30
3	Rankahake	40	100
4			30
5	Rankahake	45	100
6			30
7	Rankahake + pelletti (10–20 %)*	45	100
8			30
9	Rankahake	55	100 tai maksimi
10	Rankahake + pelletti (10–20 %)*	55	Vertailukelpoinen kokeeseen 9

*pellettien määrä asetetaan kyseiselle välille

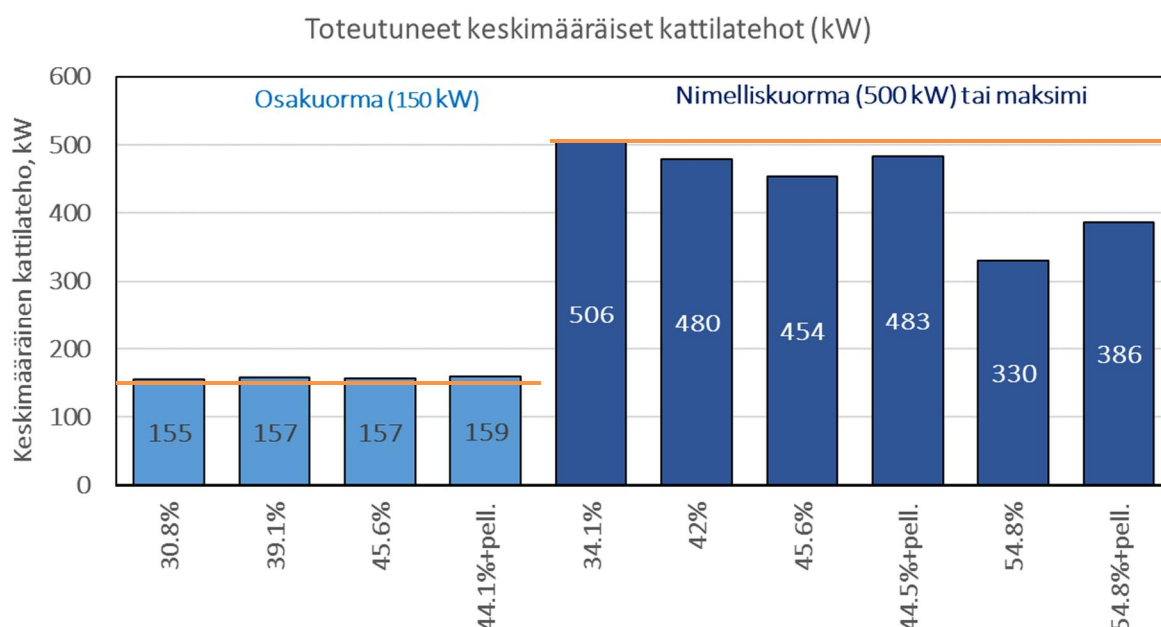
3.4 Polttokokeiden tulokset

Toteutuneet hakkeen kosteudet osuivat lähelle tavoiteltuja arvoja (Kuva 3). Ainoastaan kokeessa, jossa tavoite oli ajaa osakuormaa 35 %:n kosteudessa olevalla hakkeella, hake oli hieman tavoiteltua kuivempaa (30,8 %).



Kuva 3. Toteutuneet (sininen) ja tavoitekosteudet (oranssi) hakkeelle.

Toteutuneet keskimääräiset kattilatehot on esitetty kuvassa 4. Osateholla suoritetuissa kokeissa teho pyrittiin pitämään noin 150 kilowatissa ja toteutuneet keskimääräiset tehot osuivat välille 155–159 kW välillä. Nimelliskuormalla (500 kW) toteutuneet keskimääräiset tehot olivat välillä noin 450–500 kW lukuun ottamatta kokeita, joissa hakkeen kosteus oli 55 %. 55 %:n kosteudella ei saavutettu kattilan nimellistehoa, vaan jäätin noin 350 kW tasolle.



Kuva 4. Toteutuneet ja tavoitellut keskimääräiset kattilatehot.

Kattilahyötysuhteet oli tarkoitus laskea suoralla menetelmällä, jossa käytetään mitattua kattilatehoa sekä taseen aikana kulutettua polttoaine-energiaa tehollisen lämpöarvon mukaan laskettuna. Koska suoralla menetelmällä määritetyissä kattilahyötysuhteissa ilmeni epäloogisuuksia, arvioitiin hyötysuhteet laskennallisesti käyttämällä epäsuoraa menetelmää. Epäsuorassa menetelmässä kattilahyötysuhde (η_K) määritetään häviöiden kautta yhtälön 1

mukaisesti. Häviöt määritetään suhteessa kattilaan syötettyyn energiaan ja polttoaineen osalta käytetään tehollista lämpöarvoa.

$$\eta_K = (1 - q_A - q_U - q_S - q_B) \times 100 \%, \quad (1)$$

jossa

q_A = palamistuotteiden mukana poistuva ns. terminen lämpö (engl. sensible heat)

q_U = palamattomien kaasumaisten yhdisteiden aiheuttama häviö

q_S = säteily-, konvektio- ja konduktiohäviö

q_B = tuhkan palamattomien häviö.

Palamistuotteiden mukana poistuva termien lämpö on merkittävin häviö, ja poltettaessa vähätuhkaisia polttoaineita, se aiheutuu käytännössä täysin savukaasujen mukana poistuvasta energiasta. Tuhkan mukana poistuvan termisen lämmön vaikutus on vähäinen.

Osateholla myös säteily-, konvektio- ja konduktiohäviöt nousevat merkittäviksi, sillä niiden absoluuttinen määrä (kW) ei juurikaan riipu kattilakuormasta. Vaikka polttoaineen kosteudella ei ole suoraa yhteyttä säteily-, konvektio- ja konduktiohäviöiden määrään, eroja eri kosteuksien hakkeiden välille voi syntyä kattilasta saatavan maksimitehon kautta. Esimerkiksi näissä kokeissa 55 %:n kosteudella tehdyissä kokeissa kattilateho jäi noin 350 kW tasolle, jolloin säteily-, konvektio- ja konduktiohäviöt (%) ovat suuremmat kuin nimellisteholla ajetuissa kokeissa.

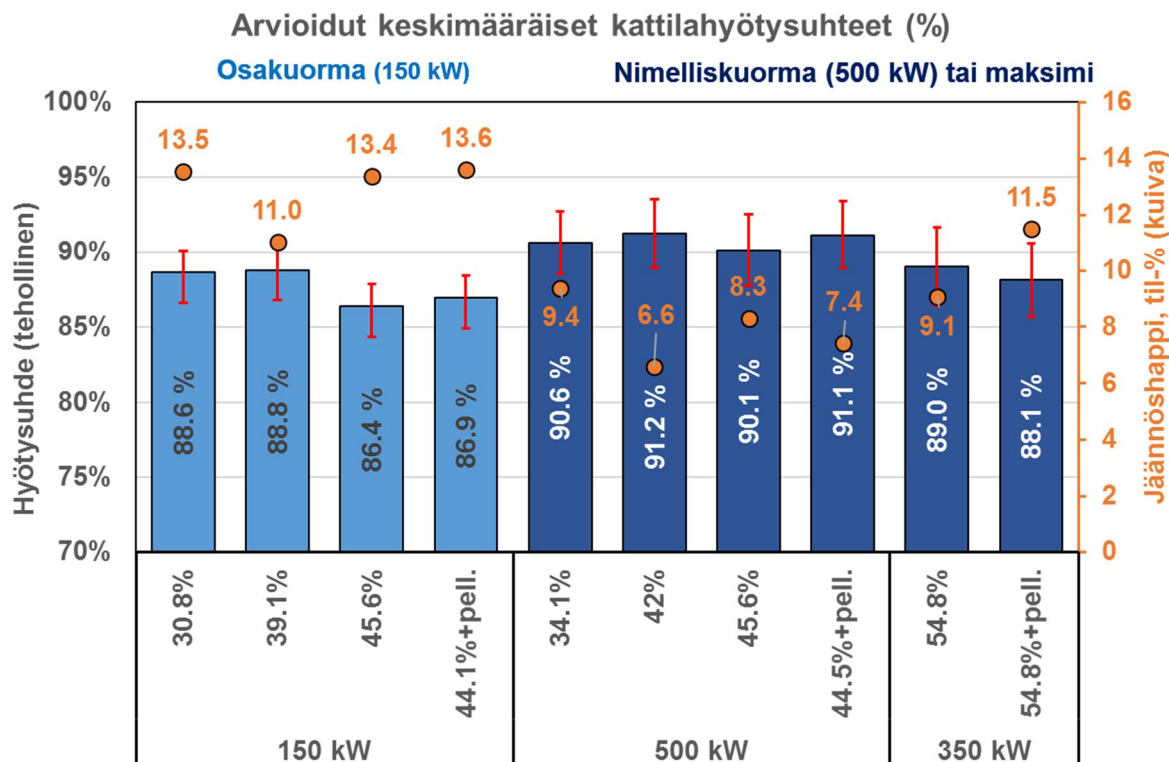
Näissä kokeissa tuhkan palamattoman aineksen aiheuttamiin häviöihin liittyy paljon epävarmuutta. Koska kokeissa ei määritetty muodostuneen tuhkan määrää eikä siinä olevan palamattoman hiilen osuutta, tämän osalta häviö on arvioitu aiempien Lähienergia-projektissa (Raitila ym. 2014) suoritettujen polttokokeiden perusteella. Näissä kokeissa ilmeni, että osakuormalla ajettaessa häviö on mitätön ja että nimellisteholla häviö nousee keskimäärin noin prosentista kahteen prosenttiin kosteuspitoisuuden kasvaessa 30 %:sta 50 %:iin. Tuloksissa oli kuitenkin melko paljon hajontaa. Tuhkien palamattomien määrä on yhdessä savukaasuhäviön kanssa merkittävä tekijä hyötysuhde-eroissa eri kosteuksilla hakkeilla ja siten se olisi ollut syytä määrittää tarkasti. Koska tухkia ei kerätty talteen, palamattomien määrää ei voitu analysoida jälkikäteen.

Epäsuoralla menetelmällä määritetyt hyötysuhteet virhemarginaaleineen on esitetty kuvassa 5.

Osakuormalla hyötysuhteet olivat hieman nimelliskuormaa alhaisempia johtuen korkeammista säteily-, konvektio- ja konduktiohäviöistä. Vaikka jäännöshappipitoisuudet olivat osakuormalla selvästi nimelliskuormakokeita korkeammalla, savukaasuhäviö oli samaa suuruusluokkaa johtuen alhaisemmista savukaasulämpötiloista osakuormalla ajettaessa. Osakuormalla savukaasun loppulämpötilat olivat noin 80 °C ja nimellisteholla pääosin 100–110 °C.

Korkeimmat hyötysuhteet saavutettiin kuivimman hakkeen sijaan ~40 %:n kosteuksisella hakkeella sekä osa- että nimelliskuormilla johtuen alhaisimmista jäännöshappipitoisista. Tätä korkeammilla kosteuksilla hyötysuhde alkaa heikentyä erityisesti osakuormalla. Osakuormalla myös kaasumaisten palamattomien yhdisteiden (lähinnä häkä, Kuva 6) määrällä alkaa olla vaikutusta hyötysuhteeseen lisääntyneen savukaasun termisen häviön lisäksi.

Pellettien seostamisen vaikutuksista ei voida vetää kovin selviä johtopäätöksiä. Tässä tehdyllä oletuksella siitä, että palamattomien määrä on suoraan verrannollinen polttoaineseoksen kosteuteen, hyötysuhde näyttää nousevan hieman seostettaessa pellettejä kokeissa, joissa hakkeen kosteus oli 45 %. 55 %:n prosentin kosteudella pelletin seospolttokokeessa selvästi korkeampi jäännöshappitaso sekä noin 12 astetta korkeampi savukaasun loppulämpötila aiheuttivat sen, että seospolttokokeessa hyötysuhde heikkeni. Seospolttokokeen noin 60 kW korkeampi kattilakuorma (Kuva 4) vaikutti osaltaan korkeampaan savukaasuhäviöön.

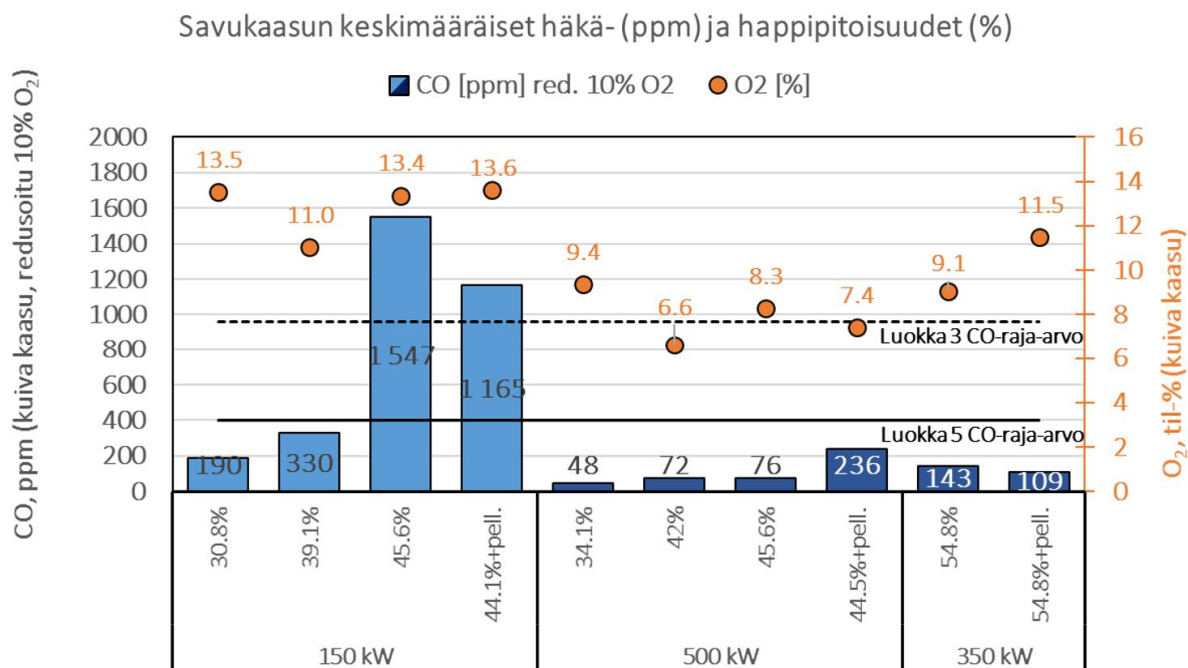


Kuva 5. Epäsuoralla menetelmällä laskennallisesti määritetyt keskimääräiset kattilahiötysuhteet.

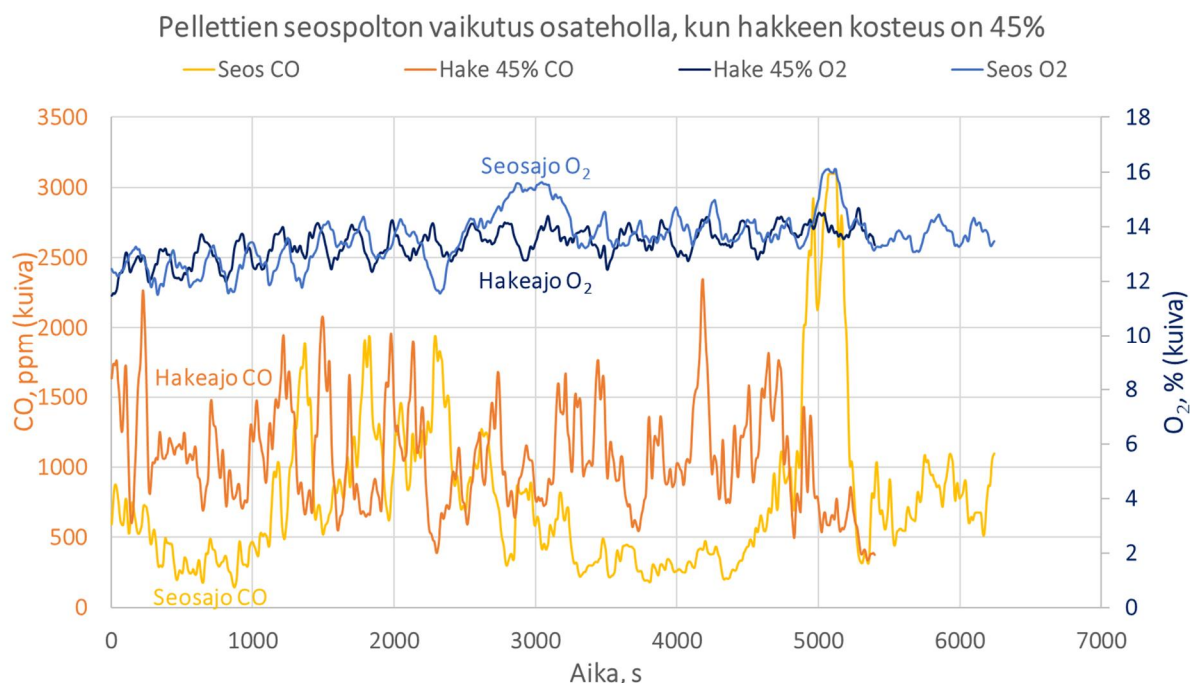
Kuvassa 6 on esitetty taseiden keskimääräiset häkä- ja happipitoisuudet kuivissa savukaasuissa. Häkäpitoisuudet on esitetty redusoituna 10 %:n jäännöshappipitoisuuteen, jotta tulokset olisivat vertailukelpoisia.

Osateholla ajettaessa häkäpitoisuudet olivat selkeästi korkeampia kuin nimellisteholla. Verrattaessa yhtä kosteita hakkeita, häkäpitoisuudet olivat osateholla noin 5–20 kertaa korkeampia. Osateholla ajetuissa taseissa häkäpäästöt nousivat hakkeen kosteuden kasvaessa. Kosteuspitoisuuden kasvu 40 %:sta 45 %:in lähes viisinkertaisti häkäpäästöt noin 1550 ppm (10 % O₂) tasolle nostaen ne selvästi yli EN-303-5:2012 -standardin mukaisten rajojen (400–960 ppm 10% O₂, luokka 5–luokka 3).

Pellettien seostaminen (11 % kokonaismassasta) 45 % kosteudessa olevan hakkeen sekaan alensi häkäpäästöä noin 25 %, mutta korkeinkin päästöraja ylittyi silti. Polttoaineseoksen kosteus oli noin 40,3 %, mutta häkäpäästöt olivat selvästi korkeammat verrattuna pelkän hakkeen polttoon 39,1 % kosteudessa. Seospolttokoe ja pelkän hakkeen (tavoitekosteus 45 %) olivat hyvin samankaltaiset sekä jäännöshappitasojen että ajojen tasaisuuksien suhteen, minkä vuoksi tulokset ovat vertailukelpoiset (Kuva 7).



Kuva 6. Keskimääräiset häkäpäästöt kuivassa kaasussa ja redusoituna 10 %:n jäännöshappipitoisuuteen sekä mitattu jäännöshappi kuivassa kaasussa. (Muuntokerroin ppm → mg/Nm³ = 1,25)



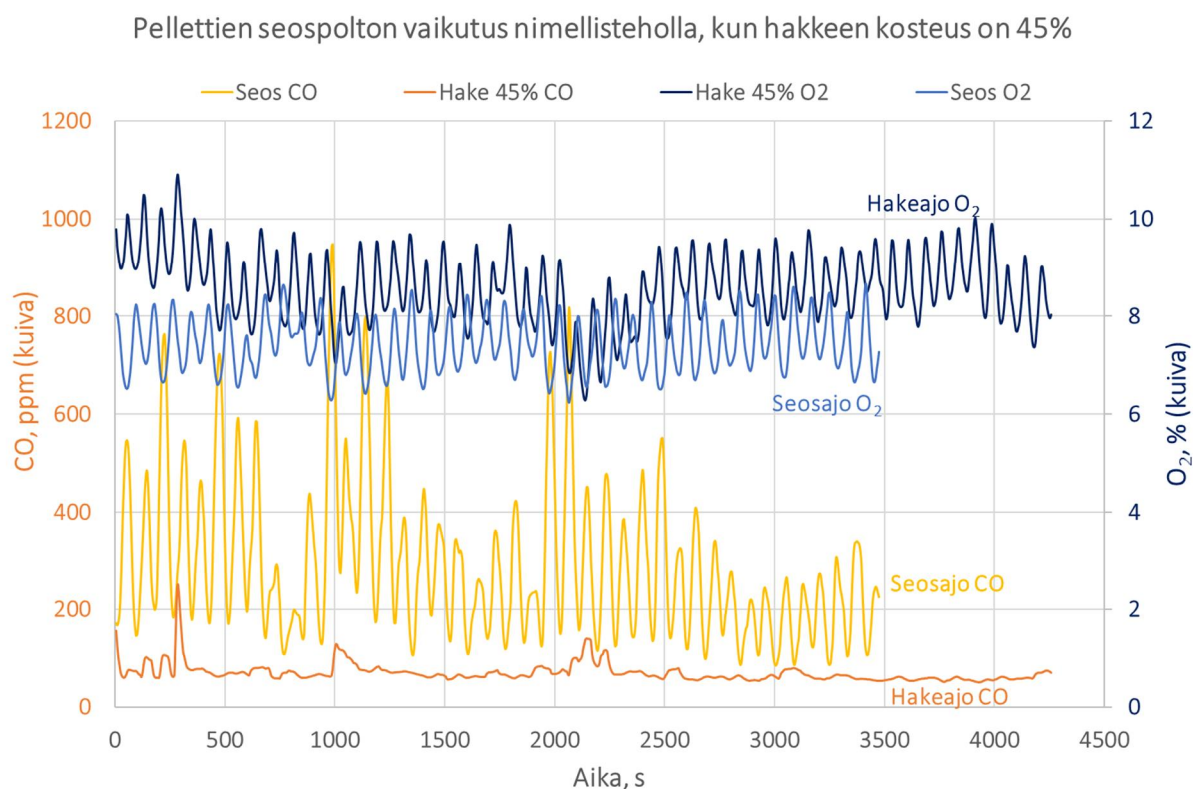
Kuva 7. Pellettien seospolton vaikutus häkäpäästöön osateholla, kun hakkeen kosteus on 45 %.

Nimelliskuormalla häkäpäästöt pysyivät matalina ja lähes samalla tasolla (48–76 ppm @ 10 % O₂) hakkeen kosteuksilla 35–45 %. Pellettien seostus (15 % kokonaismassasta, jolloin seoksen kosteudeksi tuli 39,4 %) 45 %:n kosteudessa olevan hakkeen sekaan nosti häkäpäästöä. Ilmiö selittyy ainakin osittain seospolttokokeen hieman alhaisemmalla jäännöshappitasolla (7,4 % vs. 8,3 %), sillä häkäpäästö on erittäin riippuvainen

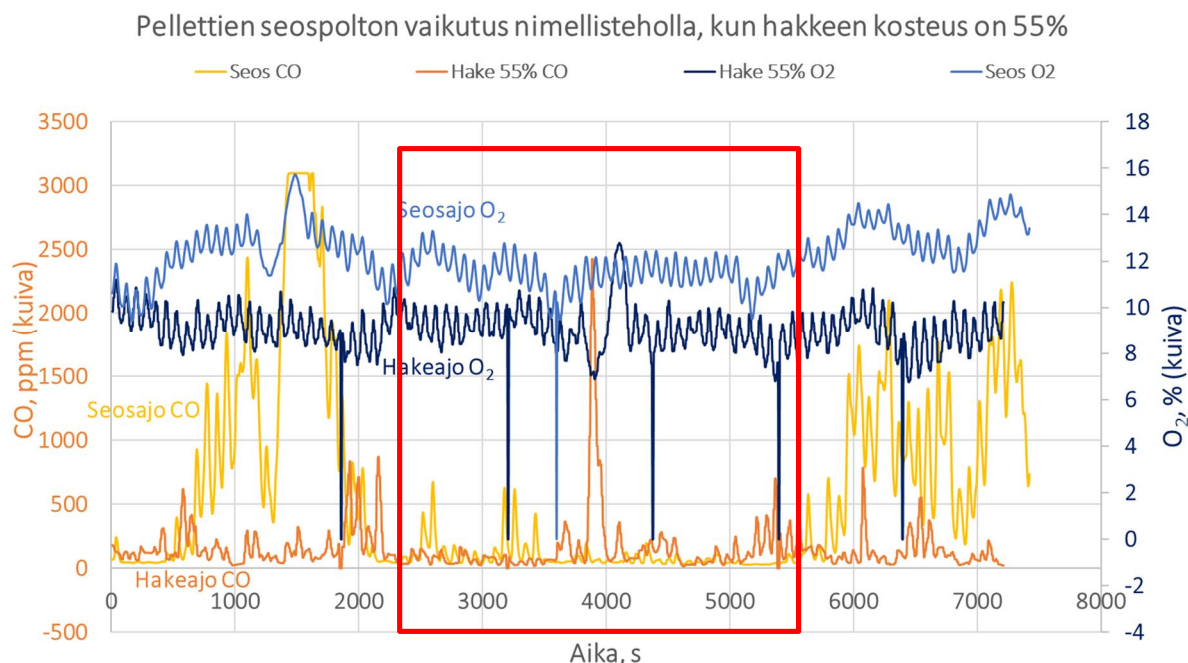
jäännöshappitasosta. On lisäksi huomioitava, että kokeessa ei pyritty minimoimaan häkäpäästöä, vaan saavuttamaan riittävän alhainen taso. Mitattu päästö (236 ppm 10 % O₂) alittaa tiukimmankin päästörajan (400 ppm 10 % O₂). Myös palamisen hallinnan vaikeutuminen poltettaessa kahta eri polttoainetta (esimerkiksi syötön epätasaisuuden kautta) voi vaikuttaa tuloksiin. Tämä näkyy häkäpitoisuuden suurempana oskillaationa (Kuva 8).

Sen sijaan 55 %:n kosteudella tehdyssä kokeessa pellettien seostus (16 % kokonaismassasta, jolloin seoksen kosteudeksi tuli 47,5 %) vähensi häkäpitoisuuden tasolta 143 ppm tasolle 109 ppm (10 % O₂). Tässä pellettien seospolttokokeessa jäännöshappi oli puolestaan korkeampi kuin pelkkää haketta käytettäessä. Kuvassa 9 on esitetty jäännöshapen ja häkäpitoisuuden vaihtelua pidemmältä aikaväliltä. Kuvaajasta nähdään, että myös liian korkeat jäännöshappitasot nostavat häkäpäästöä seospolttokokeessa. Tietyn rajan jälkeen syötetty ylimääräinen ilma ei enää edistä palamista, vaan alentaa lämpötilaa ja lyhentää viipymäaikaa. Kuvaan on merkitty myös se noin tunnin jakso, jonka ajalta keskiarvotulokset on laskettu.

Tulokset osoittavat, että kattilan säädöt vaikuttavat merkittävästi häkäpäästöihin.



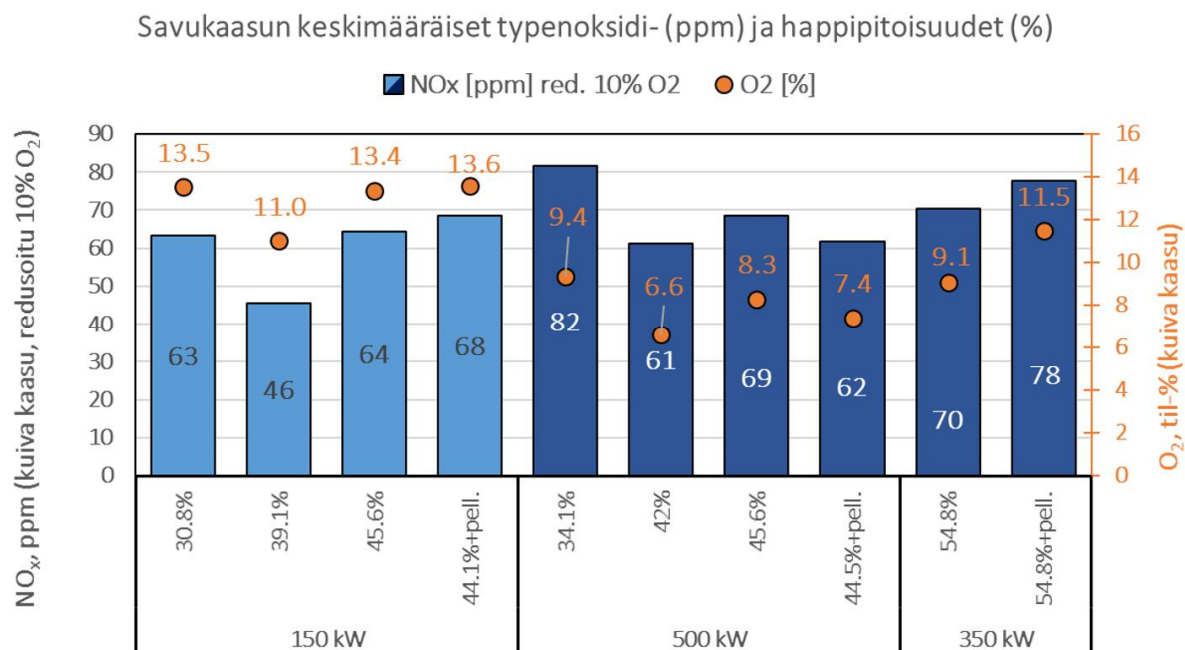
Kuva 8. Pellettien seospolton vaikutus nimellisteholla, kun hakkeen kosteus on 45 %.



Kuva 9. Pellettien seostamisen vaikutus häkäpäästöihin hakkeen kosteudella 55 % nimellisteholla ajettaessa (~350 kW). Keskiarvot seospolttokokeen osalta on laskettu punaisella merkatus jakson ajalta, jolloin prosessi oli tasainen.

Mitatut typenoksidipäästöt kuivassa kaasussa redusoituna 10 % jäännöshapteen on esitetty kuvassa 10. Osakuormalla NO_x -päästöt vaihtelivat välillä 46–68 ppm (10 % O_2) ja nimelliskuormalla välillä 61–82 ppm (10 % O_2). Yli-ilmakertoimella ja NO_x -päästöillä on havaittavissa positiivinen korrelaatio sekä osa- että nimelliskuormalla: mitä korkeampi on jäännöshappitaso, sitä korkeammat ovat myös NO_x -päästöt. Koska sopivan kuivalla hakkeella jäännöshappitaso on mahdollista laskea alemmaksi ilman, että häkäpäästöt nousevat liian korkeiksi, on myös NO_x -päästöt pääsääntöisesti alemmat kuivalla hakkeella. NO_x -päästöille ei toistaiseksi ole päästörajaja tämän kokoluokan kattiloille.

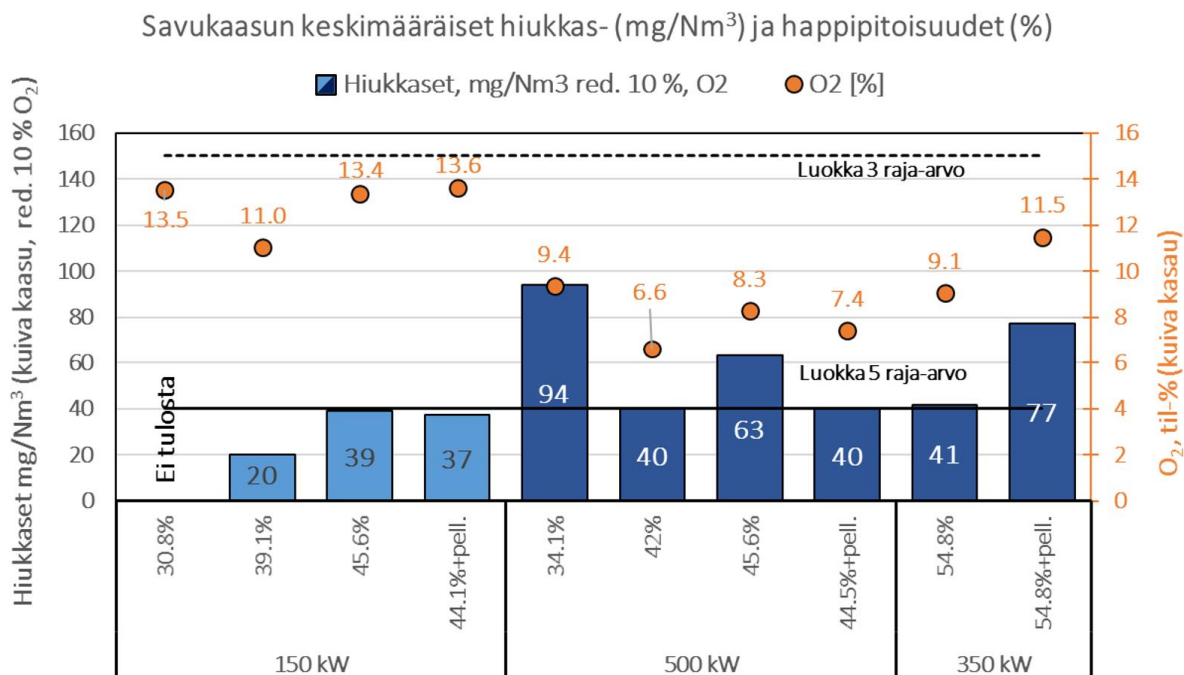
EcoDesign-direktiivin (komission asetus 2015/1189) mukaan 1. tammikuuta 2020 lähtien kiinteän polttoaineen kattiloiden (≤ 500 kW) NO_x -päästöjen tulee alittaa 97 ppm (200 mg/Nm³ NO_2 :ksi laskettuna). Muut päästörajat ovat samat kuin tässä raportissa esitetyt SFS-EN 303-5 -standardin luokan 5 rajat.



Kuva 10. Keskimääräiset typenoksidipäästöt kuivassa kaasussa ja redusoituna 10%:n jäännöshappipitoisuuteen sekä mitattu jäännöshappi kuivassa kaasussa. (Muuntokerroin ppm → mg/Nm³ NO₂ = 2,05)

Kuvassa 11 on esitetty gravimetrisellä menetelmällä mitatut hiukkaspitoisuudet. Mitatut hiukkaspitoisuudet vaihtelivat välillä 20–93 mg/Nm³ (10 % O₂), joten päästöt alittivat kaikissa kokeissa EN 303-5 -standardin mukaisen luokan 3 raja-arvon (150 mg/Nm³ 10 % O₂). Suurimmassa osassa kokeita oltiin lähellä parhaimman luokan raja-arvoa (40 mg/Nm³ 10 % O₂).

Polttoaineen kosteuden tai pellettien seostamisen vaikutuksista hiukkaspäästöihin ei ole nähtävissä kovin selviä trendejä. Korkeimmat hiukkaspitoisuudet mitattiin kuivimmalla hakkeella nimelliskuormalla ajettaessa. Hiukkaspäästöjen osalta hakkeen optimaalinen kosteus vaikuttaisi näiden kokeiden perusteella olevan noin 40 %.



Kuva 11. Gravimetrisella menetelmällä määritetyt keskimääräiset hiukaspitoisuudet kuivassa kaasussa (mg/Nm^3) ja redusoituna 10 %:n jäännöshappipitoisuuteen sekä mitattu jäännöshappi kuivassa kaasussa.

Polttokokeiden mittaustulokset on koottu taulukkoon 4. Kokeiden perusteella voidaan todeta mm.

- Jäännöshappitaso ja polttoprosessin stabiilius vaikuttavat merkittävästi päästöihin. Kattilan oikeat säädöt, tasainen polttoaineen syöttö ja ohjauslogiikka ovat avainasemassa hyvän polttotuloksen saavuttamisessa.
- Nimellisteholla ajetuissa kokeissa hakkeen kosteudella ei ollut merkittävää vaikutusta mitattuihin häkäpäästöihin kosteusvälillä 35–45 %, kun taas osateholla häkäpäästöt kasvoivat merkittävästi kosteuden kasvaessa.
- Jäännöshappitason kasvaessa NO_x-päästöt lisääntyvät sekä osa- että nimelliskuormalla. Sopivan kuivaa haketta voidaan polttaa alemmalla jäännöshappitasolla, jolloin NO_x-päästöt jäävät alemmiksi.
- Näissä kokeissa parhaat tulokset päästöjen ja hyötysuhteiden osalta saavutettiin, kun hakkeen kosteus oli noin 40 %. Tulos edustaa kuitenkin vain tätä koesarjaa ja kattilaa.
- Pelletin lisääminen ”liian kostean” hakkeen sekaan ei takaa automaattisesti hyvää lopputulosta. Seospolto voi aiheuttaa lisää haasteita kattilan hallintaan ainakin alussa, mikä voi lisätä päästöjä. Hyvillä säädöillä pellettien lisäämisellä voidaan kuitenkin parantaa määrän hakkeen palamista. Lisäksi pellettien seostuksella voidaan nostaa kattilasta saatavaa tehoa.

Taulukko 4. Polttokokeiden mittaustulokset

Koe / hakkeen kosteus	Pelletin osuus, m-%	Kattila- teho, kW	Kattila- hyöty- suhde* %	O ₂ , % (kuiva)	CO, ppm, (kuiva, 10% O ₂)	NO _x , ppm (kuiva, 10% O ₂)	Hiukkaset, mg/Nm ³ (kuiva, 10% O ₂)
30,8 %	11 %	155	88,5 %	13,5 %	190	63	n/a
39,1 %		157	88,7 %	11,0 %	330	46	20
45,6 %		157	86,3 %	13,4 %	1547	64	39
44,1 % + pelletti		159	86,8 %	13,6 %	1165	68	37
34,1 %	15 %	506	90,5 %	9,4 %	48	82	94
42,0 %		480	91,2 %	6,6 %	72	61	40
45,6 %		454	90,0 %	8,3 %	76	69	63
44,5 % + pelletti		483	91,0 %	7,4 %	236	62	40
54,8 %	16 %	330	89,0 %	9,1 %	143	70	41
54,8 % + pelletti		386	88,1 %	11,5 %	109	78	77

*epäsuoralla menetelmällä laskennallisesti arvioitu

4. Aurinkokeräimen hyödyntäminen kuivauksessa

4.1 Yleistä kuivauksesta

Kuivauksella tarkoitetaan yleisimmin veden poistamista kiinteästä aineesta tai -seoksesta. Se voi tapahtua monella tavalla, muun muassa antamalla kosteuden reagoida jonkun muun aineen kanssa, adsorboimalla kosteus toiseen aineeseen, jäähdyttämällä, haihduttamalla tai mekaanisesti puristamalla (Linna ym. 1983). Tässä tutkimuksessa tarkasteltiin vain konvektiokuivausta, jossa kosteus haihdutetaan suoraan kuivausilmaan.

Kuivaus perustuu veden haihtumiseen kostealta pinnalta. Kosteus ilmassa ja kuivattavassa materiaalissa pyrkii tasapainoon, jolloin kosteasta materiaalista vettä siirtyy ympäröivään ilmaan niin kauan, kunnes tasapainokosteus on saavutettu. Biomassan kuivauksessa tasapainokosteutta ei yleensä saavuteta, koska kostea ilma puhalletaan pois kuivattavan materiaalin ympäriltä. Tasapainokosteus riippuu lämpötilasta siten, että lämpimämmässä ilmassa tasapainokosteus on alempi. Näin ollen vesi haihtuu helpommin, kun kuivauksessa käytetään lämmintä ilmaa. (Viita 2013)

Puussa esiintyy vettä solujen soluonteloissa vapaana vetenä ja soluseinämiin sitoutuneena sidottuna vetenä. Kun puu kuivuu, siitä poistuu aluksi vapaa vesi. Vapaa vesi liikkuu nopeasti solusta toiseen kapillaarivoimien vaikutuksesta. Puun syiden kyllästymispiste (PSK) on kosteussuhde, jota korkeammilla kosteussuhteen arvoilla puussa esiintyy sidotun veden lisäksi aina vapaata vettä. Suomalaisille puulajeille syiden kyllästymispisteen ilmoitetaan olevan noin 0,28-0,32 kgH₂O/kg_{ka} (22-24 % kokonaismassasta). (Hukka 1996) Pääasiallisesti sidottu vesi liikkuu PSK:n alapuolella diffuusion vaikutuksesta. Diffuusio tarkoittaa molekyylien lämpöliikkeestä johtuvaa, toistensa kanssa kosketuksissa olevien aineiden vähittäistä sekoittumista (Sipi 2006).

Syy, miksi materiaali kuivuu, on materiaalin ja ympäristön välinen höyrynpaine-ero. Materiaalin lämpötila ja höyrynpaine riippuvat ympäristön lämpötilasta, suhteellisen kosteuden arvosta sekä materiaalin kosteussuhteesta. Mikäli materiaalissa on vapaata vettä, riippuu höyrynpaine ainoastaan lämpötilasta. Jos materiaalissa on ainoastaan sidottua vettä, riippuu höyrynpaineen arvo lämpötilan lisäksi myös materiaalin kosteussuhteesta. Kosteussuhteella tarkoitetaan puussa olevan veden ja kuiva-ainemassan suhdetta (Härkönen 2012). Tietyllä kosteussuhteella materiaalin höyrynpaine saavuttaa saman arvon kuin ympäristön höyrynpaine ja kuivuminen lakkaa. Kyseistä kosteussuhdetta kutsutaan ympäristön ja materiaalin väliseksi tasapainokosteudeksi. Tasapainokosteuden arvo samoissa ympäristön olosuhteissa vaihtelee eri materiaaleille riippuen mm. materiaalin kemiallisesta koostumuksesta ja fysikaalisesta rakenteesta. (Holmberg 2015)

Veden haihtumista voidaan nopeuttaa nostamalla kuivausilman lämpötilaa, alentamalla ilman suhteellista kosteutta, lisäämällä kuivausilman nopeutta, lisäämällä haihtumispintaa tai käyttämällä lämpimän ilman lisäksi mahdollisimman suurta lämmönsiirtoa metallipinnoilta sekä säteilyä. Lämpötilan kohotessa ilman kyky imeä vettä itseensä lisääntyy nopeasti. (Sipi 2006, Linna ym. 1983)

Kuivauksessa ongelmana ei yleensä ole se, että saataisiin haihdutettua riittävä vesimäärä puun pinnalta, vaan se miten nopeasti vesi saadaan siirtymään puun sisäosista puun pinnalle. Haihtumisnopeuden ollessa suurempi kuin kosteuden siirtyminen puun pinnalle, pinta kuivuu ja kosteuden haihtuminen hidastuu tai estyy ja syntyy kuivausvikoja. Tästä syystä haihtumisnopeuden tulisi olla yhtä suuri kuin veden liikenopeus puun sisältä pintaa kohti. Mitä raskaampaa puu on, sitä hitaampaa sen kuivuminen on, koska veden diffuusio on paksumpien soluseinämiä takia hitaampaa. (Kiiänmies 2014)

Yksittäisen hakepalan kuivumiseen vaikuttavia tekijöitä

Ympäristöstä siirtyy lämpöä hakepalan pintaan ja siitä johtumalla kappaleen sisäosiin. Lämpö voi siirtyä ympäristöstä konvektiona kaasuvirrasta ja säteilynä ympäröivistä pinnoista. Jos hakepala on kerroksessa, jossa sitä ympäröivät saman lämpöiset palat, siirtyy lämpö pääasiassa konvektiona. Lämpö saa aikaan veden höyrystymisen. (Erkkilä ym. 2010)

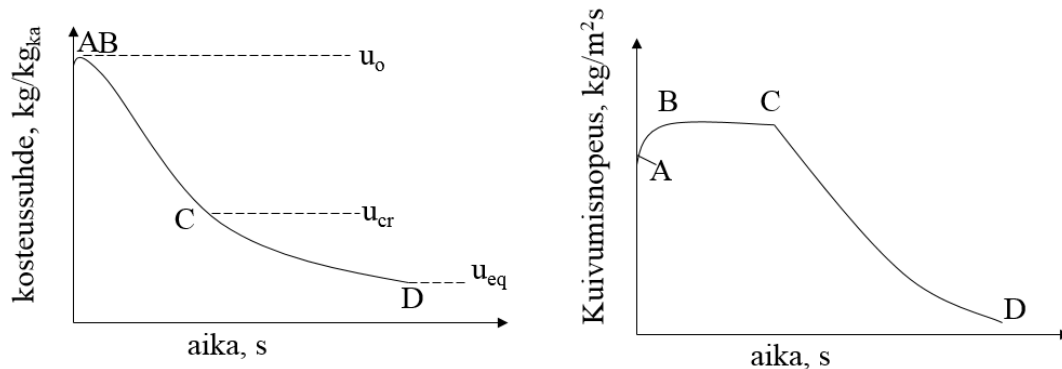
Kuivumisessa voidaan erottaa kaksi vaihetta: kuivuminen vakionopeudella ja pienenevän kuivumisnopeuden vaihe. Vakionopeusalueella kuivattavan aineen kosteus on suuri, jolloin pinta pysyy kosteana ja vesi virtaa nesteinä sisäosasta pintaan. Tällöin haihtumisnopeus ei riipu kappaleen rakenteesta eikä kosteuspitoisuudesta vaan kuivauskaasun lämpötilasta, virtausnopeudesta ja suhteellisesta kosteudesta (Linna 1983). Kun saavutetaan kriittinen kosteus, alkaa kuivumisnopeus pienetä ja vesi siirtyy pääosin höyrynä sisäosasta pintaan. Kuivauksen edistytessä kappaleen pintaa kuivuu kokonaan ja haihtuminen siirtyy kokonaan sen sisälle. Tällöin höyryn diffuusio rajoittaa osin kuivumisnopeutta. Korkeassa kuivumislämpötilassa voi paine partikkelin sisällä kasvaa, mikä osin ajaa höyryä ulos. Puun pinnasta höyry siirtyy virtaavaan kaasuun. (Erkkilä ym. 2010)

Hakepalan kuivumisnopeus riippuu hakepalan ominaisuuksista ja ympäristön olosuhteista. Kuivumisen kannalta tärkeitä ominaisuuksia ovat: (Erkkilä ym. 2010)

- palakoko - tärkeimpiä kuivumisnopeuteen vaikuttavia parametreja
- muoto
- kosteus
- alkulämpötila
- aineominaisuudet: emissiviteetti, kuivatiheys, lämmönjohtavuus, diffusiviteetti,
- permeabiliteetti, ominaislämpö.

Ympäristön vaikuttavia ominaisuuksia ovat:

- kaasun lämpötila
- ympäröivien pintojen lämpötila
- paine
- kuivauskaasun kosteus (tai suhteellinen kosteus)
- kuivauskaasun koostumus (esim. ilma, savukaasu tai höyry)
- kaasun virtausnopeus suhteessa partikkeliin



u_0 alkukosteussuhde

u_{cr} kriittinen kosteussuhde, hidastuva kuivuminen alkaa

u_{eq} kuivausympäristön tilasta riippuva tasapainokosteus

Kuva 12. Kuivumisen kolme vaihetta. Alkulämpenemisen vaihe A-B, vakiokuivumisen vaihe B-C ja hidastuvan kuivumisen vaihe C-D. (Holmberg 2015)

4.2 Aurinkoenergian potentiaali kuivauksessa

Auringon kokonaissäteilystä vain murto-osa, noin $1,7 \times 10^{14}$ kW, osuu maapallolle (Linna ym. 1983). Maapallon ilmakehän ulkopuolella neliömetrin suuruiselle pinnalle, kohtisuoraan aurinkoa vastaan, saapuu 1,35-1,39 kW säteilyteho. Tätä kutsutaan aurinkovakioksi. Aurinkovakio vaihtelee maapallon ja auringon etäisyysvaihteluiden vuoksi +/- 3,5 %. (Åman 2015)

Maapallon pinnalla aurinkovakio alenee noin 60 %:in ilmakehän heijastuksen ja absorption vuoksi. Maapallon pinnalle saapuvaa säteilyä kutsutaan välittömäksi aurinkovakioksi, joka on noin 0,8-1,0 kW/m² kirkkaana päivänä. (Åman 2015)

Maanpinnalle tulee kolmenlaista auringonsäteilyä. Suora säteily on nimensä mukaan suoraan ilmakehän läpi tulevaa säteilyä. Hajasäteily on pilvien ja ilmakehän molekyyliden heijastamaa sekä maasta heijastunutta säteilyä. Kolmas säteilyn muoto on ilmakehän vastasäteily eli niin sanottu kasvihuonevaikutus, joka aiheutuu ilmakehän vesihöyrystä, hiilidioksidista ja otsonista, jotka heijastavat lämpöä takaisin maanpinnalle (Åman 2015). Suomen oloissa keskimäärin 50 % kokonaissäteilystä on hajasäteilyä. Pilvisinä päivinä se saattaa olla jopa 80 %, mutta kirkkaana kesäpäivänä se jää noin 20 %:in vaakasuoralla pinnalla (Erat ym. 2008).

Suomessa auringonsäteily vaihtelee sijainnista riippuen etelän noin 1000 kWh/m²/v Pohjois-Suomen noin 800 kWh/m²/v vaakatasolta mitattuna (taulukko 5). Oikealla aurinkokeräimen kallistuskulmalla ja suuntauksella voidaan hyödyksi saatavaa aurinkoenergian määrää optimoida (taulukko 6). Talviaikana auringonsäteet tulevat maahan huomattavasti pienemmässä kulmassa, mikä vähentää kokonaissäteilyn murto-osaan verrattuna kesäaikaan. Marraskuusta helmikuulle säteilyä saadaan vain 5 % Etelä-Suomessa, 4 % Keski-Suomessa ja 2 % Pohjois-Suomessa koko vuoden määrästä. (Erat ym. 2008)

Taulukko 5. Keskimääräiset säteilyenergiat vaakasuoralle pinnalle kolmella paikkakunnalla (Heimonen 2011).

Kuukausi	Säteilyenergiat vaakasuoralle pinnalle paikkakunnittain, kWh/m ² /kk		
	Helsinki	Jyväskylä	Sodankylä
Tammikuu	6	5	1
Helmikuu	22	20	14
Maaliskuu	64	52	48
Huhtikuu	120	103	121
Toukokuu	166	171	121
Kesäkuu	169	159	154
Heinäkuu	181	158	146
Elokuu	127	114	95
Syyskuu	82	71	64
Lokakuu	26	25	17
Marraskuu	8	7	3
Joulukuu	4	3	0
Yhteensä, v	975	890	791

Taulukko 6. Kallistetun keräimen säteilytehon korjauskertoimet Jyväskylän olosuhteissa. Oletuksena on, ettei ympäristöstä tule varjostuksia (puut, rakennukset, yms.) (Heimonen 2011).

Kuukausi	Korjauskertoimet etelään suunnatulle keräimelle eri kallistuskulmilla				
	0°	30°	45°	60°	90°
Tammikuu	1,00	1,50	1,75	1,75	1,75
Helmikuu	1,00	1,95	2,27	2,50	2,55
Maaliskuu	1,00	1,57	1,75	1,85	1,75
Huhtikuu	1,00	1,25	1,30	1,29	1,13
Toukokuu	1,00	1,09	1,07	1,01	0,78
Kesäkuu	1,00	1,03	0,99	0,90	0,63
Heinäkuu	1,00	1,05	1,01	0,93	0,66
Elokuu	1,00	1,12	1,11	1,05	0,80
Syyskuu	1,00	1,28	1,33	1,33	1,11
Lokakuu	1,00	1,46	1,62	1,65	1,54
Marraskuu	1,00	1,33	1,33	1,50	1,33
Joulukuu	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Yhteensä	1,00	1,21	1,26	1,27	1,13

4.3 Koelaitteet ja -järjestelyt

Aurinkokuivaustutkimusta varten VTT:n Jyväskylän yksikköön rakennettiin tutkimusympäristö, jossa yhdistettiin kaupallisen valmistajan aurinkokeräinjärjestelmä ja jo entuudestaan olemassa oleva, poikkiläpimitoiltaan 1x1 m, läpivirtauskuivuri, jonka mittausantureita hyödynnetään tiedonkeruuseen sekä aurinkokuivaustutkimuksessa että vanhassa kuivausjärjestelmässä. Aurinkopiiristä tulevaa lämmintä ilmaa varten asennettiin kuitenkin erillinen tuloilmakanava.

VTT:n toimitilojen katolle asennettiin kuusi Savosolarin valmistamaa 2 m² aurinkokeräintä. Aluksi ne suunnattiin silmämääräisesti siten, että puolet keräimistä käännettiin aamupäiväauringon suuntaan ja loput iltapäivän mukaan. Tavoitteena oli lyhyen ajan

huipputehon sijasta saada koko päivän säteilyenergia tasaisesti talteen. Mitattaessa havaittiin, että keräinten kallistuskulma oli 54° ja ne oli suunnattu 103° ja 185° kulmissa pohjoisesta laskien. Myöhemmin elokuussa 2017 kallistusta muutettiin yleisen suosituksen mukaiseksi (43°) ja keräimet suunnattiin tarkemmin kaakkoon (140°) ja lounaaseen (220°). Näillä muutoksilla ei kuitenkaan havaittu olevan juurikaan merkitystä hyödyksi saatuun aurinkoenergiamäärään. Ylivoimaisesti eniten vaikuttivat säätilan vaihtelut.



Kuva 13. VTT:n aurinkokeräimet Jyväskylän tutkimusyksikön katolla.



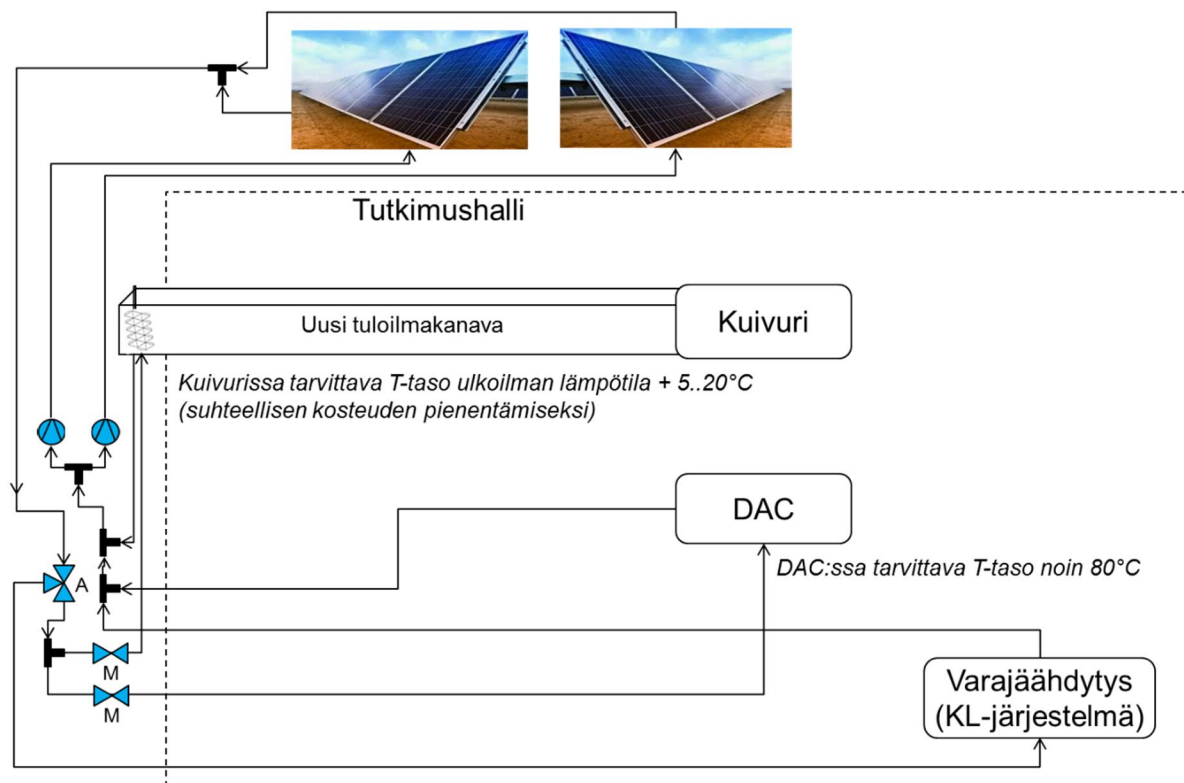
Kuva 14. VTT:n biomassakuivuri. Auringolla lämmitetty ilma tulee mustaa ilmanavaa pitkin (vasen). Oikealla sisäkuva kuivauskaapista, jossa on 0,3 m³ kuivausastia. Astian reunoja korottamalla kapasiteettia voidaan laajentaa aina yhteen kuutiometriin asti.

Aurinkolämpöjärjestelmää ohjataan ja valvotaan Resol DeltaSol MX -ohjausyksiköllä, jota käytetään aurinkolämpö-, lämmitys- ja ilmastointijärjestelmissä. Varsinaista kuivauksen ohjausta ja datankeruuta varten tehtiin kuitenkin oma ohjelma. Ohjaus voi perustua lämpötilaeroon, virtausmuutokseen tai ajastettuun toimintoon. Näissä tutkimuksissa ohjaus perustui lämmönsiirtoputkissa virtaavan glykoli-vesi seoksen lämpötilaeroihin. Aamupäivän ja iltapäivän keräinryhmiä varten on omat pumppuyksikkönsä. Resolin pumppuyksikkö sisältää kaikki aurinkopiirin tarvitsemat laitteet kuten kiertovesipumpun, sulku- ja takaiskuventtiilit, varoventtiilin sekä paine- ja lämpömittarit. Lämmönsiirtonesteestä lämpö siirretään kuivausilmaan lämmönvaihtimien (Ekocoil) avulla. Puhaltimena käytetään System Air 308 W kanavapuhallinta.



Kuva 15. Resol DeltaSol MX ohjausyksikkö.

Aurinkolämpökeräimien lämpö voidaan ohjata nykyratkaisussa kolmeen kohteeseen kuvan 16 mukaisesti. Muut aurinkolämpöön yhdistetyt lämmityskohteet ovat hiilidioksidin erotuslaitteisto (DAC) ja Jyväskylän Energian kaukolämpöjärjestelmä (JE). Kaukolämpöön kytketyn lämmönvaihtimen tarkoitus on varmistaa, ettei järjestelmä käyttämättömänä pääsisi kuumenemaan liikaa ja ettei DAC-ajossa DAC:lle pääse liian kuumaa (yli 80°C) lämpöä.



Kuva 16. Aurinkojärjestelmän periaatekuva

4.4 Tutkimusmenetelmät ja kohteen rajaus

4.4.1 Kuivausjärjestelyt

Hakkeen kuivausta tutkittiin kokeellisesti hyödyntämällä VTT:n Jyväskylässä sijaitsevaa aurinkokuivaukseen modifioitua kuivausympäristöä, joka on kuvattu edellisessä kappaleessa. Kuivattavaksi materiaaliksi valittiin pienissä lämpölaitoksissa tyypillisesti käytettävä karsitusta mäntyrangasta valmistettu hake. Hake tehtiin laikkahakkurilla sekä tuoreesta että tienvaressa noin kolme kuukautta (huhti-kesäkuu) kuivatetusta puusta. Tällä tavalla voitiin vertailla osittain kuivuneen puun kuivumista täysin tuoreeseen.

Kuivauskokeita tehtiin vuosina 2017 ja 2018 pääasiassa sekä kesä- että elokuussa ja vähäisessä määrin myös touko- ja syyskuussa. Aluksi kuhunkin koeajosarjaan kuului hakkeen kuivaus kolmella eri puhallinohjausalgoritmilla, jotka laadittiin ennen kokeiden alkua. Nopeasti huomattiin, että algoritmit ohjaavat puhaltimen toimintaa suunnitellusti. Samalla nähtiin, että edullisimmat kuivaustulokset saadaan algoritmilla 1, joka pyrki maksimoimaan kuivauksen taloudellisen hyödyn. Myöhemmässä vaiheessa, varsinkin vuonna 2018 koeajot tehtiin käyttäen vain algoritmia 1. Tulosten tarkastelussa ei otettu erikseen huomioon mahdollista algoritmiohjauksen vaikutusta, koska jokainen koeajo oli säätilaltaan ja kestoaltaan erilainen, joten algoritmin vaikutusta oli mahdoton eritellä yksiselitteisesti.

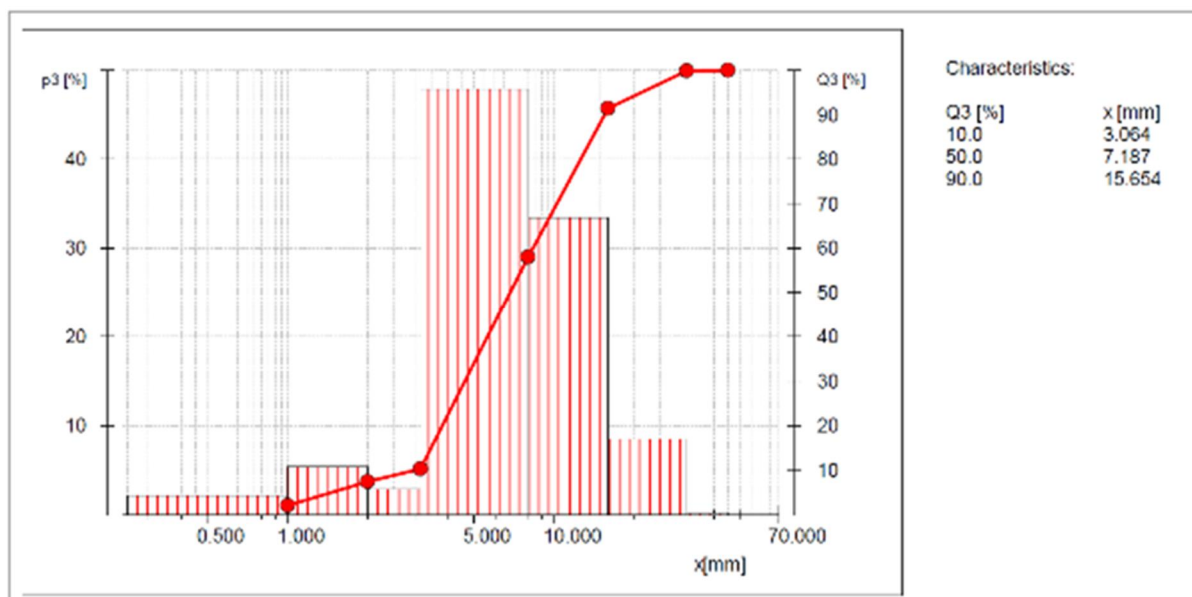
Kesäkuun 2017 koeajojen jälkeen aurinkopiirin pumppuohjaukseen tehtiin vielä joitakin tarkennuksia hyötysuhteen parantamiseksi. Samassa yhteydessä keräinten suuntausta muutettiin hieman kuten kappaleessa 4.3 on kerrottu. Huhtikuussa 2018 järjestelmään asennettiin vielä poistoilman lämmön talteenotto. Aivan viimeisissä kokeissa elokuussa 2018 testattiin kuivauksen kannattavuutta hyödyntämällä keräämistä ainoastaan puolet. Samalla nämä keräimet käännettiin suoraan etelään.

Useimmissa kokeissa kuivattiin kuivauslaatikollinen (mitat 1x1x0,3 m) haketta, tavoitteena 20-25 % loppukosteus. Tuoretta haketta mahtui laatikkoon hieman yli 60 kg ja tienvarsikuivatettua noin 50 kg. Keskimääräiset alkukosteudet olivat vastaavasti 54-55 % ja 39-48 %. Vertailun vuoksi tehtiin kokeita myös suuremmalla eräkoolla korotetun laidan avulla, jolloin erän kuivausaika piteni, mutta kuivauskapasiteetti kasvoi. Suuremmat erät olivat kooltaan 181 kg (tuore hake) ja 97-143 kg (tienvarsikuivatettu).

Taulukko 7. Laskennassa mukana olleet koekuivausmateriaalit.

Materiaali	Kosteus ennen kuivausta, p-%	Kosteus kuivauksen jälkeen, p-%	Palakokoluokka*
Tuore rankahake, 10 kuivauserää	54-55	24-32	P16, F15
Rankana osittain kuivattu hake, 12 kuivauserää	39-48	14-29	P16, F15

*SFS-EN ISO 17225-1:2014



Kuva 17. Hakkeiden palakokojakauma.

Koska kuivausolosuhteet vaihtelivat päivittäin, kirkkaasta auringonpaisteesta melko pilviseen säähän, kuivausajat (3,5-27 tuntia) ja hakkeen loppukosteudet (14-32 %) vaihtelivat merkittävästi. Tämä palveli kuitenkin hyvin tarkoitusta, sillä yhtenä keskeisenä tavoitteena oli saada kuivaustuloksia eri olosuhteissa. Samasta syystä aurinkokeräinten suuntausta muutettiin elokuussa, joskaan sillä ei ollut merkittävää vaikutusta kuivaustuloksiin.

4.4.2 Puhaltimen ohjausalgoritmit

Aurinkolämmöllä tehostetussa kuivauksessa puhaltimen ohjausjärjestelmän tavoitteena on säätää kuivaukseen puhallettavaa ilmamäärää automaattisesti siten, että kuivaus olisi optimaalista. Aurinkoenergiaa käytettäessä tämä on tärkeää, koska olosuhteet voivat muuttua nopeasti kuivauksen kannalta edullisesta tilanteesta esimerkiksi sateeksi, jolloin kuivaus kannattaa todennäköisesti keskeyttää. Algoritmit eivät kuitenkaan osaa huomioida hakkeen lämpenemistä ja sen vaatimaa energiaa kuivauksen alussa. Siksi käynnistyksen yhteydessä ohjelmaan asetetaan alkuarvo, kuinka kauan puhalletaan tasaisella nopeudella ennen algoritmiohjaukseen siirtymistä.

Kuivaus kannattaa silloin, kun siitä saadut hyödyt (tuotannon nopeuttaminen, lämpöarvon paraneminen ja/tai homehtumisriskin pieneneminen) ovat kustannuksia suuremmat. Aurinkoenergia poikkeaa monesta muusta lämmitysmenetelmästä siinä, että muuttuvat kustannukset ovat hyvin matalat. Niitä aiheuttaa lähinnä puhaltimien sähkön kulutuksesta. Kuivauksen talouden optimoinnissa voidaan pyrkiä parempaan laskennalliseen tarkkuuteen tai kuivausta voidaan ohjata oikeaan suuntaan yksinkertaisempien algoritmien avulla. Seuraavissa kappaleissa on kuvattu tässä tutkimuksessa käytetyt vaihtoehtoiset algoritmit. Algoritmeissa käytetään osittain samoja muuttujia, jotka on määritelty seuraavissa taulukoissa.

Taulukko 8. Käyttäjän manuaalisesti säädettävissä olevat suureet

Suure	Lyhenne	Yksikkö	Mahdolliset arvot
Puhaltimen ohjauksen aikaresoluutio	time	minuuttia	1 - 60 minuuttia, 1 minuutin välein
Askelmuutos ohjaukseen	step	% puhalluksen max. tilavuusvirrasta (F_{\max})	0 - 100 %, 1% välein
Tilavuusvirran minimiarvo	F_{\min}	m^3/s	0,01 - F_{\max}
Tilavuusvirran maksimiarvo	F_{\max}	m^3/s	F_{\min} - 0,5
Sähkön hinta	EPrice	€/MWh	0 - 300, 1 €/MWh välein
Biomassan hankintakustannus märkänä	BioPriceWet	€/MWh	0 - 50, 1 €/MWh välein
Biomassan arvo kuivana	BioPriceDry	€/MWh	0 - 50, 1 €/MWh välein
Biomassan kosteus ennen kuivausta	BioMoistWet	% kokonaismassasta	0-100 %
Biomassan kosteus kuivauksen jälkeen	BioMoistDry	% kokonaismassasta	0-100 %

BPrice kuvaa kuivauksesta syntyviä hyötyjä verrattuna tilanteeseen, jossa haketta ei kuivata. Hyödyn määrittäminen on monitulkintaista, sillä se riippuu vertailutilanteen ja lämpöarvon parantumisen lisäksi esimerkiksi hakeyrittäjän sopimuksista, kuljetuskustannusten pienenemisestä ja homehtumisriskin pienemisestä sekä muista varastoitavuutta parantavista tekijöistä. Voidaan olettaa, että lämpöarvon nousu (MWh) on vähintään polttohakkeen hinta, eli tasoa 20 €/MWh, käytännössä toki enemmän.

Taulukko 9. Mittauksiin ja laskentaan perustuvat suureet.

Suure	Lyhenne	Yksikkö
Puhaltimen sähköteho	P_E	kW
Veden haihdutukseen käytetty lämpöteho	P_{H_2O}	kW
Haihdutettu veden massavirta	m_{H_2O}	kg/s
Ilmavirran absoluuttinen kosteus ennen kuivuria	a_1	g/m^3
Ilmavirran absoluuttinen kosteus kuivurin jälkeen	a_2	g/m^3
Höyryn paine ennen kuivuria	e_1	mbar
Höyryn paine kuivurin jälkeen	e_2	mbar
Ilman virtaus kanavassa	F_{real}	m^3/s
Kuivauksen taloudellinen hyöty	Hyödyt	€/h
Kuivauksen muuttuvat kustannukset	Kustannukset	€/h

4.4.2.1 Algoritmi 1, kannattavuuden euromääräinen laskenta

Tämän algoritmin tarkoitus on hakea taloudellinen optimi mittaamalla kuivattavasta materiaalista poistuvaa vesimäärää (lämpöarvon lisäystä) ja laskemalla sen taloudellista arvoa. Koska optimi riippuu monesta tekijästä kuten puhallusnopeudesta, lämmön siirrosta eri vaiheiden välillä optimia haetaan kokeilemalla puhaltimen eri nopeuksia ja vertaamalla taloudellista kannattavuutta edellisen mittausvaiheen kannattavuuteen.

Ohjaukselle asetetun aikaresoluution (time) välein tehdään aina seuraava tarkastelu. Koska ohjauksen aikaresoluutio voi olla paljon kertyvän mittausdatan aikaresoluutiota pidempi, yhden time:n aikana kertyneen mittausdatan osalta käytetään datan keskiarvoa.

Lasketaan kuivauksen taloudellinen Voitto

$$\text{Voitto [€/h]} = \text{Hyödyt [€/h]} - \text{Kustannukset [€/h]}$$

missä:

$$\text{Kustannukset [€/h]} = E_{\text{Price}} * P_E / 1000$$

$$\text{Hyödyt [€/h]} = B_{\text{Price}} * P_{H_2O} / 1000$$

$$B_{\text{Price}} = (\text{BioPriceDry} * M_{\text{Whdry}} - \text{BioPriceWet} * M_{\text{Whwet}}) / (M_{\text{Whdry}} - M_{\text{Whwet}})$$

$$M_{\text{Whdry}} = (19 - 2,3 * \text{BioMoistDry} / (1 - \text{BioMoistDry})) / 3600$$

$$M_{\text{Whwet}} = (19 - 2,3 * \text{BioMoistWet} / (1 - \text{BioMoistWet})) / 3600$$

Kaavoissa vakiot 19 ja 2,3 ovat puun kuiva-aineen lämpöarvo ja veden höyrystymislämpö yksikössä MJ/kg.

$$P_{H_2O} = m_{H_2O} [kg/s] * 2258 [kJ/kg]$$

$$m_{H_2O} = \Delta a / 1000 * F_{\text{DRY}} [m^3/s]$$

$$\Delta a = a_2 - a_1$$

a_1 ja a_2 lasketaan samoilla kaavoilla, merkitään seuraavissa alaindeksillä i

$$a_i = ((217,6 * e_i) / (T_i + 273,16)) * RH_i / 100$$

$$e_i = (1,0007 + p_i \cdot 0,00000346) \cdot 6,1115 \cdot \exp((17,502 \cdot T_i)/(240,9 + T_i))$$

RH_i , T_i ja p_i ovat suhteellinen kosteus [%], lämpötila [°C] ja paine [hPa]. Ulkoilman paine (p_1) oletetaan vakioksi, jonka lukuarvo kaavassa on 1013. Muut suureet mitataan sekä ulkoilmasta (ilmanottoaukon kohdalta) että kuivurin jälkeen ja tarvittaessa muutetaan edellä mainittuihin yksiköihin.

F_{DRY} = oletetaan olevan sama kuin F_{real} (muutos mittauksesta sekuntia kohden eli m^3/s), koska veden tilavuusvirta (osapaine) on hyvin pieni verrattuna ilman tilavuusvirtaan (100% kosteudellakin max. 2%...3%).

Ensimmäisellä ohjelman tarkastelukierroksella tallennetaan vain tarkasteluhetken Voitto ja virtausnopeus F_{real} muistiin (Voitto_{ED} ja F_{realED}) ja kasvatetaan puhaltimen nopeutta lähtöarvona annetun siirtymäportaan verran.

Sen jälkeisillä tarkastelukierroksilla, jos

uuden tarkasteluhetken Voitto < Voitto_{ED}, palataan edelliseen puhallusnopeuteen F_{realED} ja lasketaan time:n jälkeen Voitto uudelleen (saman puhallusnopeuden Voitto lasketaan siten tarkoituksella useita kertoja, koska olosuhteet voivat muuttua tai jostain muusta syystä yksittäisellä kerralla voi tulla virheellisen suuri Voitto, jolloin algoritmi ilman uudelleen laskentaa jäisi ajamaan tätä nopeutta). Tallennetaan tämä uusi Voitto uudeksi Voitto_{ED} -arvoksi ja muutetaan puhaltimen nopeutta portaan verran eri suuntaan (suuremmaksi/pienemmäksi) kuin edellisellä kierroksella.

Muissa tapauksissa (eli jos Voitto \geq Voitto_{ED}), tallennetaan uusi taloudellinen Voitto Voitto_{ED}-arvoksi ja tehdään stepin suuruinen muutos puhaltimen nopeuteen samaan suuntaan kuin edellisellä kierroksella.

F_{min} raja-arvoa ei kuitenkaan aliteta eikä F_{max} -arvoa ylitetä, vaan näissä pisteissä kokeillaan timen välein yhden portaan verran suuremmalla/pienemmällä nopeudella, onko tilanne muuttunut eli kannattaako tehoa laskea tai nostaa.

4.4.2.2 Algoritmi 2, Absoluuttisen kosteuden muutoksen maksimointi

Tämän algoritmin tarkoitus on hakea mahdollisimman suotuisaa puhallusnopeutta mittaamalla kuivattavasta materiaalista poistuvaa vesimäärää puhallettavaa ilmakeuutiometriä kohden. Koska optimi riippuu monesta tekijästä (puhallusnopeudesta, lämmön siirrosta eri vaiheiden välillä jne.) optimia haetaan kokeilemalla puhaltimen eri nopeuksia. Algoritmi 2 on hyvin samankaltainen kuin algoritmi 1, mutta ei ohjaudu kustannuslaskennan mukaan.

Koeajoa käynnistettäessä aloitetaan puhallusnopeus oletusarvoisesti F_{min} ja F_{max} keskiarvosta.

Ohjaukselle asetetun aikaresoluution (time) välein tehdään aina seuraava tarkastelu. Koska ohjauksen aikaresoluutio voi olla paljon kertyvän mittausdatan aikaresoluutiota pidempi, käytetään yhden timen aikana kertyneen mittausdatan osalta datan keskiarvoa.

Lasketaan Δa kuten algoritmissa 1.

Ensimmäisellä ohjelman tarkastelukierroksella tallennetaan vain tarkasteluhetken Δa ja virtausnopeus F_{real} muistiin (Δa_{ED} ja F_{realED}) ja kasvatetaan puhaltimen nopeutta asetetun portaon verran.

Sen jälkeisillä tarkastelukierroksilla, jos

uuden tarkasteluhetken $\Delta a < \Delta a_{ED}$, palataan edelliseen puhallusnopeuteen F_{realED} ja lasketaan time:n jälkeen Δa uudelleen (saman puhallusnopeuden Δa lasketaan siten tarkoituksella useita kertoja, koska olosuhteet voivat muuttua tai jostain muusta syystä yksittäisellä kerralla voi tulla virheellisen suuri Δa , jolloin algoritmi ilman uudelleen laskentaa jäisi ajamaan tätä nopeutta). Tallennetaan tämä uusi Δa uudeksi Δa_{ED} -arvoksi ja muutetaan puhaltimen nopeutta portaan verran eri suuntaan (suuremmaksi/pienemmäksi) kuin edellisellä kierroksella.

Muissa tapauksissa (eli jos $\Delta a \geq \Delta a_{ED}$) tallennetaan uusi taloudellinen Δa Δa_{ED} -arvoksi ja tehdään portaan suuruinen muutos puhaltimen nopeuteen samaan suuntaan kuin edellisellä kierroksella.

F_{min} raja-arvoa ei kuitenkaan aliteta eikä F_{max} -arvoa ylitetä vaan näissä pisteissä kokeillaan timen välein yhden portaan verran suuremmalla/pienemmällä nopeudella, onko tilanne muuttunut eli kannattaako tehoa laskea tai nostaa.

4.4.2.3 Algoritmi 3, Kahden nopeuden ohjaus

Tämän algoritmin tarkoitus on kuivata asetusnopeudella silloin, kun kuivaus kannattaa ja ajaa puhallin minimiasetukseen, kun kuivaus ei kannata. Tällainen ratkaisu voi olla realistinen todellisen hakeytäjän tapauksessa, jolloin käytössä ei välttämättä ole säädettäviä puhaltimia tai mahdollisuutta monimutkaisiin algoritmeihin.

Koeajoa käynnistettäessä annetaan manuaalisesti haluttu F_{real} , johon puhaltimen nopeus säätyy.

Ohjaukselle asetetun aikaresoluution (time) välein tehdään aina seuraava tarkastelu. Koska ohjauksen aikaresoluutio voi olla paljon kertyvän mittausdatan aikaresoluutiota pidempi, käytetään yhden aikaportaan aikana kertyneen mittausdatan osalta datan keskiarvoa.

Lasketaan kuivauksen taloudellinen Voitto kuten algoritmista 1. Jos Voitto > 0 jatketaan virtausmäärällä F_{real} . Jos Voitto ≤ 0 , puhallin ajetaan minimiasetukseen F_{min} .

4.4.2.4 Manuaalisesti asetettava puhaltimen nopeus

Ohjausalgoritmien lisäksi kuivuria on mahdollista ohjata manuaalisesti asetetuilla arvoilla. Koeajoa käynnistettäessä annetaan manuaalisesti tavoiteltava ilmamäärä F_{real} , johon puhaltimen nopeus säätyy. Kuivurin käyttäjä voi säätää puhaltimen ilmamäärää haluamukseen kuivauksen aikana.

4.4.3 Mittaukset ja laskentaperusteet

Kuivauksen aikana mitattiin ja rekisteröitiin useita eri muuttujia:

- Puhaltimen sähkövirta, A
- Kuivausilman määrä, Nm^3/h
- Sisään tulevan ja ulos menevän ilman suhteellinen kosteus, %RH
- Sisään tulevan ja ulos menevän ilmanpaine, mbar
- Sisään tulevan ja ulos menevän ilman lämpötila, °C
- Kuivausilman lämpötila lämmönvaihtimen jälkeen, °C
- Lämmönsiirtonesteen (vesi-glykoli) lämpötila useassa eri kohtaa putkistoa, °C

- Lämmönsiirtonesteen virtausmäärä, litraa/h
- Auringonsäteilyn määrä vaakasuoralla pinnalla, W/m^2

Hakkeen alkuperäiseksi hinnaksi asetettiin 21 €/MWh perustuen keskimääräisiin hintatilastoihin. Kuivauksen oletettiin nostavan hakkeen hintaa, tässä tapauksessa hintaan 25 €/MWh, koska kuivempi hake on laadukkaampaa. Oletuksena oli, että pienen kokoluokan (<1 MW) hakelämmittäjät ovat valmiita maksamaan enemmän kuivasta hakkeesta, koska sillä voidaan varmistaa kattilan häiriötön toiminta ja tuottaa enemmän lämpöä pakkaskauden aikaan. Kuivaa haketta voidaan myös varastoida pitempiä aikoja ilman pilaantumisriskiä. Esimerkiksi mautiloilla koko vuoden puupolttoainemäärä voitaisiin varastoida hakkeena, mikäli se olisi kesällä kuivattu alle 30 % kosteuteen.

Kuivauslaitteistossa käytetyn sähkön hinnaksi oletettiin 110 €/MWh. Edellä mainittujen oletusten ja mittausten perusteella tehtiin seuraavat laskelmat:

- Kuivauksen lämpöteho, kW
- Vesihöyryn massavirta, kg/h
- Haihdutetun veden kokonaismäärä, kg
- Ilman absoluuttinen kosteus ennen kuivuria ja kuivurin jälkeen, g/Nm^3
- Sähkönkulutus, kWh
- Kuivausilmaan siirtynyt lämpö, kW
- Kuivauksen hyöty, €/MWh_{haihdutettu vesi}, €/h
- Kuivauskustannus, €/h

Kuivauskokeiden jälkeen hakkeen kuivauksen kannattavuutta tarkasteltiin mitatun auringonsäteilyn, haihdutetun vesimäärän sekä kustannus- ja hyötylaskelmien perusteella. Kuivauksen aikana haihtunut vesimäärä määritettiin punnitsemalla hake-erät ennen ja jälkeen kuivauksen.

Kuivauksen kannattavuus - hake-erän arvon lisäys vähennettynä sähkökustannuksilla - määritettiin kokeiden aikana vaakasuoralle pinnalle tulleen auringonsäteilyn funktiona. Jotta koko kuivaussysteemin kannattavuutta voitiin arvioida käytännön mittakaavassa ja vuositasolla, tulokset ekstrapoloitiin vuodessa saatavilla olevan auringon säteilyn suhteen ja skaalattiin suurempaan kokoluokkaan.

Korrelaatio kuivauksen kannattavuuden ja auringonsäteilyn välillä on selvä siitä huolimatta, että olosuhteet kuivauskokeiden aikana vaihtelivat. Tällä perusteella koeajojen tulokset ekstrapoloitiin vuoden ajalle kuivauskauden aikana saatavilla olevan auringon säteilymäärän mukaan. Kokonaissäteilynä käytettiin keskimääräistä kumulatiivista auringonsäteilyä Jyväskylän seudulla, joka määritettiin PVGIS -työkalun avulla (JRC 2017). Kannattavan kuivauskauden oletettiin alkavan maaliskuun alussa jatkuen syyskuun loppuun, jolloin vuotuinen säteily vaakasuoralle pinnalla kyseisen laskurin mukaan on 807 kWh/m^2 . Näin ekstrapoloituna tulokset kuvaavat sitä taloudellista hyötyä, joka koelaitteella olisi ollut mahdollista tuottaa, mikäli sitä olisi käytetty maaliskuun alusta syyskuun loppuun.

Tulokset skaalattiin kahteen kokoluokkaan, eli sisältämään joko 90 m^2 (maatilakokoluokka) tai 5000 m^2 (bioenergiaterminaali) aurinkokeräimiä. Skaalaus tehtiin olettamalla kuivauskapasiteetti ja kuivauksesta saatava hyöty suoraan verrannolliseksi aurinkokeräimien pinta-alaan. Näin ollen koeajojen tuloksista vuositasolle ekstrapoloitu käyttökate kerrottiin keräinpinta-alojen suhteella $90 \text{ m}^2 / 12 \text{ m}^2$ ja $5000 \text{ m}^2 / 12 \text{ m}^2$. Kokeissa, joissa käytössä oli vain puolet keräimistä (6 m^2 keräinala), tulokset kerrottiin suhteilla $90/6$ ja $5000/6$.

Investointien osalta oletettiin, että maatilakuivuri rakennetaan olemassa olevaan rakennukseen kuten maatilan konehalliin tai latoon. Tällöin investointeihin laskettiin puhallin-, lattian koolaus ja kanavointikustannukset sekä vähäiset rakennuskustannukset kuivauskamarin rakentamiseksi. Suuremman kokoluokan kuivuri laskettiin kuitenkin kokonaisuudessaan uusinwestointina, koska ei ole todennäköistä, että näin suurta rakennusta

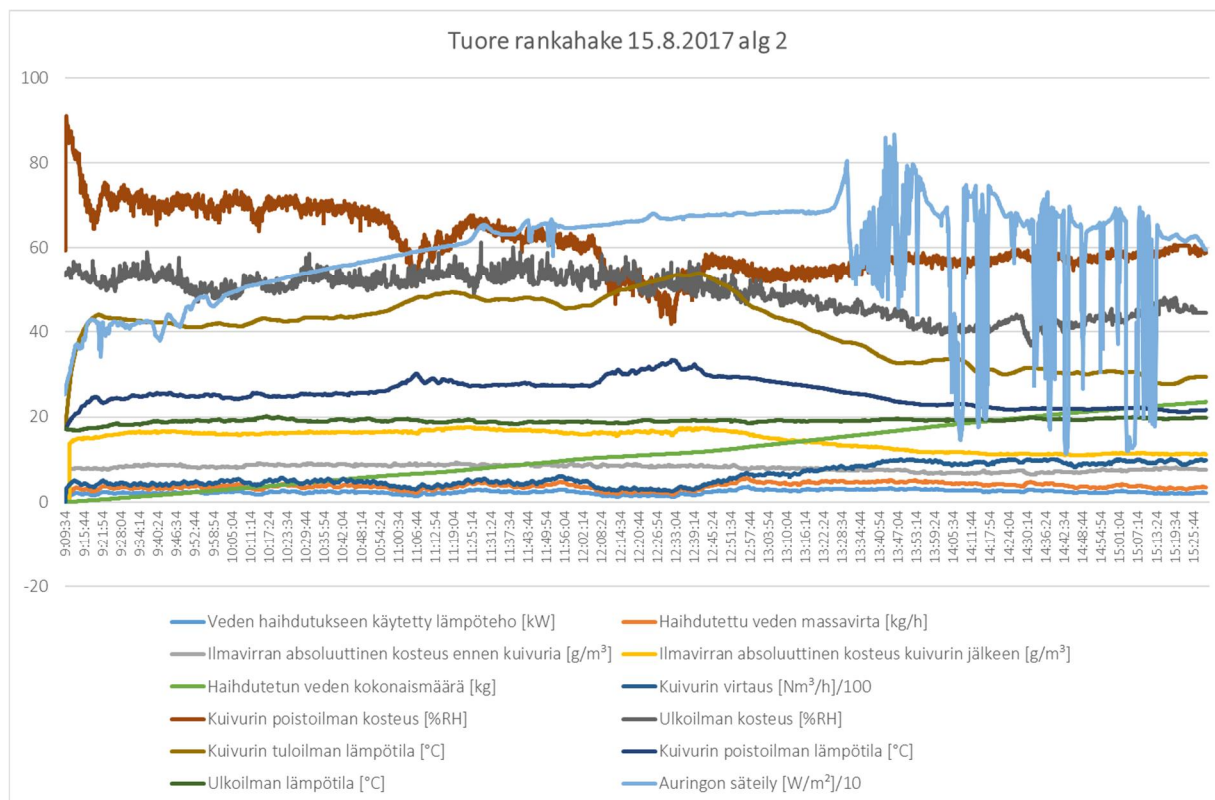
olisi valmiina tähän käyttöön. Lisäksi jälkimmäiseen investointiin lisättiin erillinen varastorakennus, sillä koko kuivattu hakemäärä ei mahdu kuivurin yhteyteen. Apuna käytettiin Pro Agrialta saatuja kustannustietoja ja havainnekuvia (Keski-Mattinen 2018). Kaikkein suurin kustannus aiheutuu kuitenkin aurinkokeräimistä ja niiden asentamisesta. Laskennoissa käytettiin suomalaisen keräinvalmistajan, Savosolarin, kustannusarvioita. Yhteensä skaalattujen kuivureiden investointikustannukset arvioitiin olevan pienemmälle kuivurille 62 900 € (alv. 0%) ja suuremmalle 2 365 000 € (alv. 0%). Tarvittavien investointien ja vuosittaisten käyttökatteiden avulla laskettiin investointien takaisinmaksuajat huomioimatta korkokuluja.

4.5 Kuivauskokeiden tulokset

Ensimmäisten koejaksojen aikana vuonna 2017 vaakasuoralle pinnalle tullut kumuloituva auringonsäteily vaihteli 1,1 ja 3,7 kWh/m² välillä kuivauskokeiden aikana. Vastaavasti säteilyteho vaihteli 211 ja 590 W/m² välillä. Vaihtelu luonnollisesti johtui säätilan muutoksista. Algoritmien ohjaamina kuivausilman puhallusmäärät vaihtelivat 614:sta 975:en normikuutioon tunnissa (Nm³/h). Aurinkoisina päivinä kuivauslämpötilat saavuttivat ajoittain 50 °C, mutta pilvisen sään aikana ne jäivät noin 20 asteeseen, jolloin kuivausilma oli vain muutamia asteita ulkoilmaa lämpimämpää. Tärkeimmät mittaustulokset on esitetty taulukossa 10 ja yhden kuivauskoeajan mittaukset on esimerkin vuoksi esitetty kuvassa 18.

Taulukko 10. Vuoden 2017 kuivauskokeiden mittaustuloksia. Tv. hake = tienvarsirangasta tehty hake.

Keräinten suuntaus	Vanha			Uusi	Vanha			Uusi		
Hake	Tv. hake 1	Tv. hake2	Tv. hake3	Tv. hake4	Tuore hake5	Tuore hake6	Tuore hake7	Tuore hake8	Tuore hake9	Tuore hake10
Kuivauserän alkumassa, kg	52,6	51,9	52,5	53,9	66,3	62,7	60,4	60,6	60,1	62,3
Alkukosteus, %	42,0	42,0	42,0	42,0	54,0	54,0	54,0	54,0	54,0	54,0
Loppukosteus, %	28,6	18,3	16,0	27,6	31,6	30,3	31,9	30,6	23,9	24,4
Algoritmi	3	1	2	1	1	2	3	2	1	2
Kesto, h	5,3	5,1	5,9	5,1	4,7	6,3	7,9	8,6	6,7	7,7
Keskim. kuivausilma-määrä, Nm ³ /h	616	912	801	967	929	614	755	825	975	936
Ulkoilman suht. kosteus, %	62	64	55	58	52	49	63	60	53	55
Ulkoilman lämpötila, °C	19,7	18,4	20,2	13,3	19,2	19,1	19,0	14,3	13,1	13,0
Keskim. säteilyteho, W/m ²	291	468	387	211	590	584	365	365	522	481
Kokonais-säteily, kWh/m ²	1,6	2,4	2,3	1,1	2,8	3,7	2,9	3,1	3,5	3,7
Haihdutetun Veden määrä, kg	9,9	15,1	16,3	10,8	22,2	21,8	20,0	20,9	24,2	24,8
Energia-sisällön lisäys, kWh	6,2	9,5	10,2	6,7	13,9	13,6	12,5	13,1	15,2	15,5



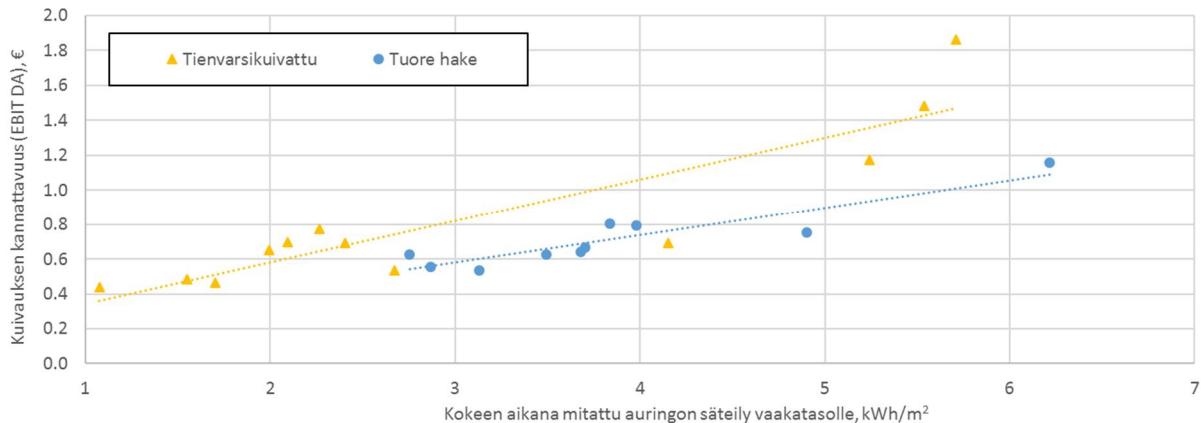
Kuva 18. Tuoreen rankahakkeen kuivauksen mittaustulokset 15.8.2017 kuivauskokeessa algoritmilla 2.

Toisten koejaksojen aikana vuonna 2018 ja elokuussa 2017 vaakasuoralle pinnalle tullut kumuloituva auringonsäteily vaihteli 1,7 ja 6,2 kWh/m² välillä kuivauskokeiden aikana. Vastaavasti säteilyteho vaihteli 193 ja 721 W/m² välillä. Vaihtelu luonnollisesti johtui säätilan muutoksista. Lisäksi on huomattava, että kokeissa 15, 18 ja 20 kuivaus jatkui yön yli. Algoritmien ohjaamina kuivausilman puhallusmäärät vaihtelivat 420:sta 811:een normikuutioon tunnissa (Nm³/h). Aurinkoisina päivinä kuivauslämpötilat saavuttivat ajoittain lähes 60 °C, mutta pilvisen sään aikana ja luonnollisesti yöllä ne jäivät selvästi alle 20 asteen, jolloin kuivausilma oli vain muutamia asteita ulkoilmaa lämpimämpää. Tärkeimmät mittaustulokset on esitetty taulukossa 11.

Taulukko 11. Vuoden 2017 (elokuu) ja 2018 kuivauskokeiden mittaustuloksia. Tv. hake = tienvarsirangasta tehty hake.

Keräinten suuntaus	Uusi											
Hake	Tuore hake11	Tuore hake12	Tuore hake13	Tuore hake14	Tv. hake15	Tv. hake16	Tv. hake17	Tv. hake18	Tv. hake19	Tv. hake20	Tv. hake21	Tv. Hake22
Kuivauserän alkumassa, kg	65,4	62,2	62,2	181,4	139,4	50,7	44,0	143,5	42,1	106,9	44,9	96,9
Alkukosteus, %	55,4	55,4	55,4	55,4	46,0	46,0	44,0	48,0	38,7	38,7	38,7	38,7
Loppukosteus, %	23,9	27,2	17,2	40,8	18,5	19,3	16,9	13,8	20,0	21,5	16,3	25,4
Algoritmi	1	3	2	1	1	1	2	1	1	1	1	1
Kesto, h	6,3	7,2	5,5	11,0	25,9	6,6	5,8	21,9	6,0	27,2	3,5	6,8
Keskim. Kuivausilmam., Nm ³ /h	747	420	713	772	629	764	537	621	685	480	811	745
Ulkoilman suht. kosteus, %	44	33	30	29	52	37	34	48	53	82	50	54
Ulkoilman lämpötilä, °C	21,1	18,3	22,7	21,9	9,6	11,8	17,3	19,2	18,3	16,7	23,4	19,4
Keskim. Säteilyteho, W/m ²	636	676	704	563	213	405	721	261	282	193	566	309
Kokonais-säteily, kWh/m ²	4,0	4,9	3,8	6,2	5,5	2,7	4,2	5,7	1,7	5,2	2,0	2,1
Haihdutetun veden määrä, kg	27,1	24,1	28,3	44,8	47,0	16,8	15,4	56,9	9,8	23,8	12,0	13,8
Energiasisällön lisäys, kWh	17,0	15,1	17,8	28,1	29,5	10,5	9,7	35,7	6,1	14,9	7,5	8,6

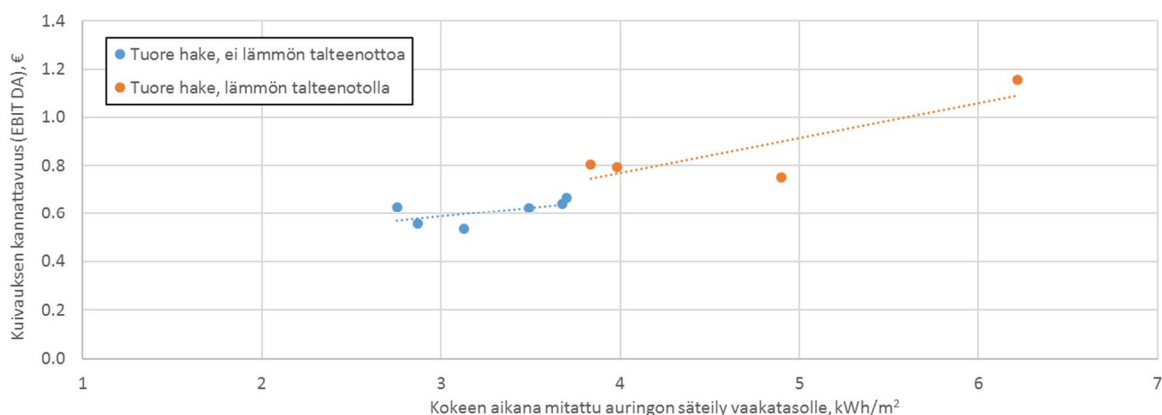
Kaikkien kuivauskokeiden kannattavuus auringonsäteilyn funktiona on esitetty kuvassa 19. Kuivattavien materiaalien eroilla, tässä tapauksessa lähtökosteudella, oli selvästi suurempi vaikutus kuin säätilan muutoksilla. Tienvarsirankahakkeesta piti kuivattaa selvästi vähemmän vettä kuin tuoreesta hakkeesta, mikä luonnollisesti parantaa kuivauksen kannattavuutta. Sähkönkulutus on ainoa kuivauksesta aiheutunut muuttuva kustannus. Työkustannusten arvioitiin olevan vähäisiä, joten niitä ei laskettu mukaan.



Kuva 19. Aurinkolämmöllä tehostetun kuivauksen kannattavuus (käyttökate, EBIT DA yksikössä euroa per kuivattu erä) tehdyissä koeajoissa. Kuvaan on koottu eri olosuhteissa tehdyt kokeet vaakatasolle kokeen aikana kertyneen auringon säteilyn funktiona.

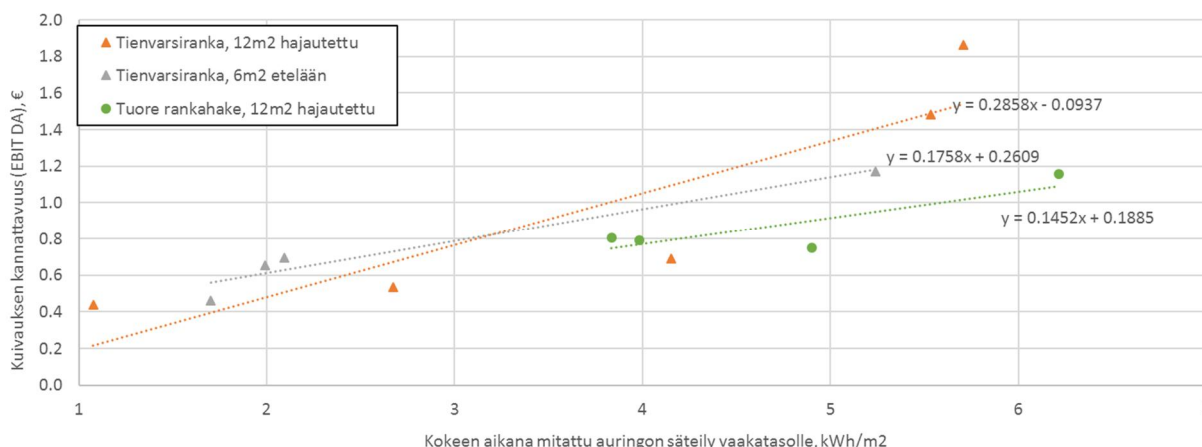
Kuvassa 19 on mukana tulokset hyvin erilaisista koeolosuhteista. Lineaarisista sovitteista näkyy, kuinka kuivauksesta saatu hyöty riippuu kokeen aikana kertyneestä auringon säteilyenergiasta. Niistä näkyy myös, kuinka tienvarsikuivatusta rangasta tehdyn hakkeen kuivaus kannattaa paremmin kuin tuoreen hakkeen kuivaus. Selkeä ero kannattavuudessa johtuu oletetuista hinnoista. Koska molemmille haketyypeille oletettiin sama hinta ilman kuivausta (21 €/MWh), ja toisaalta kuivauksen jälkeen (25 €/MWh, huolimatta merkittävästä erosta kosteudessa, kuivauksesta saatava arvon nousu haihdutettua vesikiloa kohden on huomattavasti suurempi tienvarsikuivan hakkeen tapauksessa. Laskelmassa ei huomioitu mahdollisia kuiva-ainetappioita tienvarsikuivauksessa eikä nopeutettua pääomien tuloutusta. Kuiva-ainetappioiden pieneneminen ja hyöty nopeammasta tuloutuksesta keinokuivauksen avulla parantaisi tuoreen hakkeen keinokuivauksen kannattavuutta.

Keväällä 2018 asennetun lämmön talteenoton hyöty näkyy kuvassa 20, jossa on verrattu käyttökate 2017 ja 2018 koeajojen välillä. Vertailussa on mukana vain tuoreet hakkeet, koska tievarsikuivattujen hakkeiden kosteuksissa oli vaihtelua. Lämmön talteenoton jälkeen sekä sovitteen taso, että kulmakertoimen johtavat parempaan kannattavuuteen vuositasolla.



Kuva 20. Käyttökate tuoreen hakkeen kuivauksessa ennen ja jälkeen lämmön talteenoton. Hankkeen aikana asennetun lämmön talteenoton hyöty näkyy sekä sovitteen tasokorotuksena että jyrkempänä kulmakertoimena johtaen merkittävään eroon vuositason kannattavuudessa.

Koska lämmön talteenotto paransi merkittävästi kuivauksen kannattavuutta, tarkastellaan järjestelmän takaisinmaksuaikaa huomioiden ainoastaan tulokset, joissa lämmöntalteenotto oli asennettuna. Kuvassa 21 on esitetty samat tulokset kuin aiemmin kuvassa 19, mutta huomioiden vain lämmön talteenotolla ajatut kokeet ja ryhmitellen mittauspisteet kolmeen ryhmään.



Kuva 21. Kannattavuusarvioinnissa käytetyt koetulokset ja lineaariset sovitteet kolmelle tapaukselle, joille lasketaan takaisinmaksuaika.

Edellisessä luvussa selitettiin kuivauksen kannattavuuslaskennan perusteet. Taulukossa 12 on esitetty kuvasta 21 vuositason ekstrapoloituihin erilaisten kuivaustapausten käyttökatteet koelaitteen kokoluokassa, sekä kahdessa suuremmassa tarkastellussa kokoluokassa. Niiden ja edellä esitettyjen investointikustannusten perusteella taulukkoon on laskettu myös järjestelmän takaisinmaksuaika.

Taulukko 12. Vuositasolle ja kolmeen kokoluokkaan skaalatut tulokset kannattavuudesta ja niiden perusteella lasketut takaisinmaksuajat ilman korko- ja henkilöstökuluja. (WACC = weighted average cost of capital, pääoman keskimääräinen painotettu kustannus)

	Käyttökate (EBIT DA), €/vuosi			Takaisinmaksuaika (WACC 0%), vuotta	
	Koe-kuivuri	90 m ² järjestelmä	5000 m ² järjestelmä	90 m ² järjestelmä	5000 m ² järjestelmä
Tienvarsiranka, perustuen koetuloksiin 6 m ² järjestelmällä	142	2 132	118 472	29	20
Tienvarsiranka, perustuen koetuloksiin 12 m ² järjestelmällä	231	1 730	96 085	36	25
Tuore hake, perustuen koetuloksiin 12 m ² järjestelmällä	117	880	48 914	71	48

Lasketut takaisinmaksuajat eivät ole kovin houkuttelevia yrittäjän näkökulmasta ilman tukia. Jo koetuloksista nähtiin, että tienvarsikuivatun rankahakkeen kuivaaminen on kannattavampaa kuin tuoreen hakkeen, jos mahdollisia vaikutuksia kuiva-ainetappioihin ja varastointiaikoihin ei huomioida. Suurimmalla järjestelmällä saavutetaan lyhimmat takaisinmaksuajat johtuen suuruuden ekonomiasta eli lähinnä pienemmästä aurinkolämpöjärjestelmän ominaisinvestoinnista. Erityisen mielenkiintoisia ovat 6 m² keräinalalla tehdyistä kokeista skaalatut tulokset. Koska 6 m² keräinala heikensi käyttökatetta vain vähän verrattuna 12 m² keräinalaan, tuon datan skaalaus 5000 m² kokoluokkaan johtaa lyhimpään takaisinmaksu aikaan. Tulos indikoi sitä, että VTT:n koelaitteen aurinkolämpöjärjestelmä on

tarpeettoman suuri suhteutettuna kuivurin kapasiteettiin ja 6 m² keräinalalla kannattaisi tehdä lisää kokeita johtopäätösten varmentamiseksi.

Investointitukia on usein saatavilla puhtaisiin energiaratkaisuihin, jolloin investoinnin takaisinmaksuaika lyhenee merkittävästi. Toisaalta kuivauksen tehokkuutta voidaan selvästi parantaa verrattuna VTT:n koekuivuriin. Voidaan myös olettaa, että ainakin ajoittain on saataville paljon edullisempaa sähköenergiaa kuin oletettu 110 €/MWh. Ennusteiden mukaan Nordpoolista olisi saatavilla sähköä jopa alle 30 €/MWh hedge-markkinahintaan vuonna 2020, mikä viittaa siihen, että spot-markkinoilla sähkö olisi vieläkin edullisempaa (Nasdaq 2017). Näihin hintoihin pitää kuitenkin lisätä verot ja siirtokustannukset, jotta vertailu kuluttajahintoihin olisi mahdollista. Joka tapauksessa on mahdollista, että sähkö on investoinnin pitoaikana laskennassa käytettyä 110 €/MWh edullisempaa ainakin kesäaikaan, jolloin kuivauskin tapahtuisi.

Koejärjestelyllä saatiin tyyppillisesti nostettua kuivattavan biomassan energiasisältöä noin 40% suhteutettuna koejakson aikana vaakatasolle kertyneeseen auringon säteilyyn laskettuna käytössä olleelle keräinalalle. Parhaimmassa kokeessa (20.8.2018) energiasisältö nousi 70% kokeen aikana vaakatasolle kertyneeseen säteilyyn verrattuna. On syytä korostaa, että kyseinen suhdeluku on indikatiivinen, eikä sitä tule tulkita hyötysuhteena monestakaan syystä. Esimerkiksi pimeällä säteilyn lähestyessä nollaa tarkasteltu suhdeluku lähestyy ääretöntä.

Edellä mainituilla perusteilla tehtiin herkkyystarkastelut, joissa kaikissa oletettiin 30% investointituki. Koeajojen perusteella laskettujen tulosten lisäksi tehtiin tarkastelut, joissa oletettiin, että koko kuivauskauden ajan kuivauksen tehokkuus olisi parhaimman kokeen mukainen eli 70% suhteessa vaakatasolle kertyneeseen säteilyyn. Lisäksi tehtiin herkkyystarkastelu, jossa sähkön hintana käytettiin 50 €/MWh sisältäen verot ja siirron muuttuvan kustannuksen, sekä tarkastelu, jossa maatilakokoluokassa ei ole hyödynnettävissä olevaa rakennusta, vaan joudutaan investoimaan uuteen. Lopuksi kuivauksen kannattavuutta arvioitiin vielä kuivatun hakkeen hinnoilla 21 ja 23 €/MWh (taulukko 13).

Taulukko 13. Kuivureiden takaisinmaksuajat 30% investointituella ja herkkyytarkastelun mukaisilla kustannustekijöillä.

	30% investointituki		30% investointituki ja sähkö 50 €/MWh		Maatilakuivuri uudella rakennuksella ja 30% inv.tuella
Aurinkojärjestelmän keräinpinta-ala	90m ²	5000m ²	90m ²	5000m ²	90m ²
Tienvarsiranka, perustuen koetuloksiin 6 m ² järjestelmällä	21	14	ei laskettavissa, koska sähkön hinta vaikuttaa merkittävästi koeajoihin		29
Tienvarsiranka, perustuen koetuloksiin 12 m ² järjestelmällä	25	17			52
Tuore hake, perustuen koetuloksiin 12 m ² järjestelmällä	50	34			71
Tienvarsiranka olettaen hyödyksi 70% vaakatasolle kertyvästä säteilystä	10	7	9	6	13
Tuore hake olettaen hyödyksi 70% vaakatasolle kertyvästä säteilystä	20	14	17	12	25
Tienvarsiranka olettaen hyödyksi 70% vaakatasolle kertyvästä säteilystä ja kuivan tuotteen hinnaksi 23 €/MWh	18	12	16	11	23*
Tuore hake olettaen hyödyksi 70% vaakatasolle kertyvästä säteilystä ja kuivan tuotteen hinnaksi 23 €/MWh	33	22	26	18	38*
Molemmat raaka-aineet olettaen hyödyksi 70% vaakatasolle kertyvästä säteilystä ja kuivan tuotteen hinnaksi 21 €/MWh	99	67	56	38	80*

* sähkönhintana käytetty 50 €/MWh

Investointituki ja järjestelmän suurempi tehokkuus vaikuttavat merkittävästi kuivureiden takaisinmaksu-aikaan. Sen sijaan edullisempi sähkön hinta lyhentää takaisinmaksu-aikaa vain vähän. Tämä on ymmärrettävää, koska sähköstä aiheutuva kustannus on pieni verrattuna kiinteisiin kustannuksiin. Puhallinalgoritmien vaikutusta ei ole huomioitu näissä edullisemmissä laskelmissa. On kuitenkin oletettavaa, että niiden kuivausta optimoiva vaikutus tekee kuivauksen vieläkin edullisemmaksi.

Taulukosta 13 nähdään, että mikäli järjestelmän tehokkuus saadaan viritettyä esitetyille tasolle, alle 10 vuoden takaisinmaksuajat ovat realistisia molemmissa tarkastelluissa kokoluokissa edellyttäen, että kuivatun hakkeen myyntihinta on 4 €/MWh korkeampi kuin kostean.

5. Lämpölaitoksen kesäajan lämmöntuotanto

Yhtenä toimeksiannon tehtävistä oli arvioida, kannattaako pieni alle 1 MW lämpölaitos sulkea kesäajaksi ja tuottaa asiakkaille lämpö joko aurinkokeräimillä tai lämpöpumpulla.

5.1 Nykyinen lämmöntuotanto

Realistisen vertailun helpottamiseksi päätettiin seurata lämpölaitoksen kesäajan lämmöntuotantoa, polttoaineiden kulutusta sekä lämpölaitoksen toiminnasta aiheutuvia operatiivisia kustannuksia. Tutkittavaksi laitokseksi valittiin Hirvaskankaalla toimiva Äänekosken energian omistama 1 MW lämpöyrittäjävetoinen lämpölaitos. Seurantajakso oli 15.6.-29.7.2018, jonka aikana laitoksen toiminnasta vastaava yrittäjä keräsi tiedot tuotetusta lämmöstä, kulutetuista polttoaineista, otti säännöllisesti kosteusnäytteet polttohakkeesta sekä rekisteröi kaikki oleelliset käyttökustannukset. Sähkönkulutusta ei kuitenkaan huomioitu, koska kattilan kuluttamaa sähköä ei voitu erikseen mitata ja erottaa esimerkiksi kiertovesipumppujen kulutuksesta.

Seurantajaksolla haketta vastaanotettiin kaksi kertaa, ensin 15.6. 37 irtokuutiota (10 700 kg) ja 27.6. kaksi kuormaa yhteensä 74 irtokuutiota (19 220 kg). Ensin mainittu erä oli valmistettu karsitusta sekarangasta (havu- ja lehtipuu) ja jälkimmäiset kokopuusta (havu- ja lehtipuu). Jakson lopussa haketta oli jäljellä noin 5 irtokuutiota (laskennallisesti noin 1100 kg), joten koko aikana haketta kului lämmöntuotantoon 106 irtokuutiota (28 800 kg).

Seurannan aikana varastossa olleesta hakkeesta otettiin kosteusnäytteet noin kolmen päivän välein, jotta voitiin seurata kosteuden muutosta. Mitattu alkukosteus ensimmäiselle hake-erälle oli 31 % ja toiselle 32 %. Koska hake kuivui varastossa, hake-erille laskettiin keskimääräinen kosteus, jota vastaavaa lämpöarvoa käytettiin laskennoissa. Hake-erien keskimääräisenä kosteutena käytettiin näin ollen 28 ja 27 %, mikä vastaa tehollisina lämpöarvoina 13,2 ja 14,4 MJ/kg.

Kyseisenä aikana energiaa tuotettiin 61 MWh, josta 3,6 MWh öljyllä ja loput hakkeella. Öljyä jouduttiin käyttämään kattilan savukaasupuhaltimen remontin ajan, jolloin hakekattila ei ollut toiminnassa. Laskennoissa tämän oletettiin vastaavan normaalia huoltoseisokkia. Laitoksen muita käyttökustannuksia aiheuttivat normaalit tarkastuskäynnit, muutama häiriöstä aiheutunut hälytys sekä henkilöstön työtunnit. Yhteensä kustannuksia kertyi 2820 euroa eli noin 46 euroa tuotettua megawattituntia kohti hakekattilan hyötysuhteen ollessa 85 %. Kesäajan huoltokustannukset sisältävät ainakin osittain vuosihuoltoa, joten on vaikea yksiselitteisesti erottaa, mitkä kustannukset aiheutuivat vain kesäajan käytöstä.

5.2 Lämmöntuotanto lämpöpumpuilla tai aurinkokeräimillä

Hankkeessa arvioitiin yleisellä tasolla kahta vaihtoehtoa vähentää lämpölaitoksen hakkeen kulutusta kesäaikana. Ensimmäisen vaihtoehtona tarkasteltiin aurinkolämpöjärjestelmää, joka voitaisiin teknisesti toteuttaa, mutta taloudellinen kannattavuus verrattuna olemassa olevaan hakekattilaan jää heikoksi. Tämä johtuu lähinnä aurinkolämpöjärjestelmän merkittävästä investointikustannuksesta ja tuotannon vaihtelevan luonteen aiheuttamasta varastointi- tai säätötarpeesta. Riittävän suuri lämpövarasto ja aurinkojärjestelmän ylimitoitus kattamaan

myös pilvisten päivien lämmöntarpeen johtaisi huomattavaan lisäinvestointiin. Ilman lämpövarastoa ei voida taata jatkuvasti riittävää lämmöntuotantoa, jolloin pilvisinä jaksoina jouduttaisiin käyttämään kohteen öljykattilaa, mistä seuraisi varsin negatiivisia talous- ja ympäristövaikutuksia. Realistisin vaihtoehto vaikuttaisi olevan pieni aurinkolämpöjärjestelmä täydentämään lämmön tuotantoa kesällä kuitenkin siten, ettei hakekattilan minimikuorma alitu ja tuotantoa voidaan säätää hakkeella.

Toisena vaihtoehtona tarkasteltiin lämpöpumppuja haastatellen lämpöpumpputoimittajaa. Kesäajan käyttöä ajatellen ilma-vesilämpöpumppu olisi maalämpöä edullisempi, koska ilma-vesilämpöpumpun investointikustannus on maalämpöä alempi. Tarkasteltu pumppu maksaisi kohteeseen mitoitettuna ja asennettuna noin 37 k€. Kyseisen aluelämpöverkon lämpötila on kuitenkin ilma-vesilämpöpumpulle haasteellisen korkea eikä helposti säädettävissä. Se voi johtaa tilanteeseen, jossa vettä pitää pumpun lisäksi kuumentaa suoralla sähköllä tai varalla olevalla öljykattilalla. Lämpöpumpun hyötysuhde (ns. COP-kerroin) heikkenee, mitä kuumempaa lämpöä tarvitaan. Mikäli kesäaikana olisi mahdollista hyödyntää matalampia lämpötiloja, ilma-vesilämpöpumppu voisi olla kannattava investointi.

Jos aluelämpöverkon lämpötilatasoa saataisiin kesäkaudella laskettu ilma-vesilämpöpumpulle sopivammalle tasolle, on investointi mahdollista saada kannattamaan. Esimerkiksi noin 70 °C lämpötilatasolla pumppu toimisi jo kesäkuukausina hyvällä COP-kertoimella, jolloin takaisinmaksuaika riippuu sähkösopimuksesta, sähkön hinnoista ja niiden aikadynamiikasta ulkolämpötilojen suhteen, sekä vaikutuksista hakekattilan käyttöön ja kustannuksiin (erityisesti huoltokustannukset). Käytännössä edullisia sähkön hintoja ja lämpöpumpun (COP-kertoimen) kannalta suotuisia olosuhteita pitäisi olla samaan aikaan tuhansia tunteja vuosittain, jotta investointi kannattaisi.

Tässä lämpöpumpputarkastelussa ei huomioitu kaikkia mahdollisia lämpöpumppuratkaisuja, joiden joukosta voi hyvinkin löytyä tarkasteltuun kohteeseen sopivampi ratkaisu. Esimerkiksi Calefa Oy julkisti lokakuussa 2018 uuden kuumalämpöpumppunsa, jolla voidaan nostaa prosessiteollisuuden hukkalämpöjen lämpötilaa jopa 130 °C tasolle. Hukkalämpöjen käyttö lämmön lähteenä saattaa kuitenkin poiketa merkittävästi tässä tarkastellusta suljetun kaukolämpökierron paluuveden lämpötilan nostamisesta, eikä tämän tarkastelun puitteissa ehditty tarkemmin selvittää Calefan ratkaisua.

6. Yhteenveto ja johtopäätökset

6.1 Rankahakkeen polttotutkimus

Hakkeen polttokokeet tehtiin kattilatestausstandardin (EN303-5:2012) mukaisesti 500 kW kattilalla tehotasoilla 30 ja 100 % kuitenkin niin, että testiaika lyhennettiin kuudesta tunnista noin tuntiin. Polttoaineena käytettiin männystä tehtyä rankahaketta (Kuva 2, Taulukko 1) tavoitekosteuksissa 35, 40, 45 ja 55 %, jotta voitiin selvittää polttoaineen kosteuden vaikutuksia kattilan toimintaan. Hake kuivattiin biotalousinstituutin hakekuivurissa.

Lisäksi tutkittiin, kuinka puupellettien seostaminen määrän hakkeen sekaan vaikuttaa polttotuloksiin. Kokeissa pelletin (Vapo laatuluokka A1, Taulukko 1) seospolton vaikutusta tutkittiin poltettaessa haketta kosteuksissa 45 ja 55 %. Pelletti lisättiin erillisellä syöttimellä.

Kokeissa määritettiin savukaasun koostumus sekä määritettiin kattilan hyötysuhde. Savukaasuista analysoitiin O₂-, CO₂-, CO-, NO_x- ja hiukkaspitoisuudet. Hiukkaspitoisuudet määritettiin gravimetrisesti. Tuhkan määrää ja koostumusta ei analysoitu.

Kokeissa kattilan säätöjä (ilmamäärät, ilmajako, arinan liike) haettaessa pyrittiin saavuttamaan tavoiteltu tehotaso sekä pitämään prosessi tasaisena ja häkäpäästöt kohtuullisissa rajoissa (<400 ppm). Käytettävissä olleilla resursseilla ei kuitenkaan ollut mahdollista hakea optimaalisimpia ajoparametreja joka kokeeseen.

Johtopäätökset kattilakokeista:

- Jäännöshappitaso ja polttoprosessin stabiilius vaikuttavat merkittävästi päästöihin. Kattilan oikeat säädöt, tasainen polttoaineen syöttö ja laatu sekä ohjauslogiikka ovat avainasemassa hyvän polttotuloksen saavuttamisessa.
- Nimellisteholla ajetuissa kokeissa hakkeen kosteudella ei ollut merkittävää vaikutusta mitattuihin häkäpäästöihin kosteusvälillä 35–45 %, kun taas osateholla häkäpäästöt kasvoivat merkittävästi kosteuden kasvaessa. Verrattaessa yhtä kosteita hakkeita, häkäpitoisuudet olivat osateholla noin 5–20 kertaa korkeampia ja nousivat hakkeen kosteuden kasvaessa. Kosteuspitoisuuden kasvu 40 %:sta 45 %:in lähes viisinkertaisti häkäpäästöt, jotka ylittivät selvästi EN303-5:2012 standardin häkäpäästörajat. On huomattava, että merkittävä osa kattilan vuotuisesta lämpökuormasta tuotetaan lähellä testeissä ollutta osatehoa.
- Mitä korkeampi on jäännöshappitaso, sitä korkeammat ovat myös NO_x-päästöt. Sopivan kuivaa haketta voidaan polttaa alemmalla jäännöshappitasolla, jolloin NO_x-päästöt jäävät alemmiksi.
- Näissä kokeissa parhaat tulokset päästöjen ja hyötysuhteiden osalta saavutettiin, kun hakkeen kosteus oli noin 40 %. Tulos edustaa kuitenkin vain tätä koesarjaa ja kattilaa.
- Pelletin lisääminen ”liian kostean” hakkeen sekaan ei takaa automaattisesti hyvää lopputulosta. Seospolto voi aiheuttaa lisää haasteita kattilan hallintaan ainakin alussa, mikä voi lisätä päästöjä. Hyvillä säädöillä pellettien lisäämisellä voidaan kuitenkin parantaa määrän hakkeen palamista. Lisäksi pellettien seostuksella voidaan nostaa kattilasta saatavaa tehoa.

6.2 Kuivaus aurinkolämmön avulla

Aurinkokuivaustutkimusta varten VTT:n Jyväskylän yksikköön rakennettiin tutkimusympäristö, jossa yhdistettiin kaupallisen valmistajan aurinkokeräinjärjestelmä, sisältäen 6 keräintä (yhteensä 12 m²) ja jo entuudestaan olemassa oleva, poikkiläpimitoiltaan 1x1 m, läpivirtauskuivuri, jonka mittausantureita hyödynnetään tiedonkeruuseen sekä aurinkokuivaustutkimuksessa että vanhassa kuivausjärjestelmässä.

Kuivauskokeita tehtiin vuosina 2017 ja 2018 pääasiassa sekä kesä- että elokuussa ja vähäisessä määrin myös touko- ja syyskuussa. Aluksi kuhunkin koeajosarjaan kuului hakkeen kuivaus kolmella eri puhallinohjausalgoritmilla, jotka laadittiin ennen kokeiden alkua. Nopeasti huomattiin, että algoritmit ohjaavat puhaltimen toimintaa suunnitellusti. Samalla nähtiin, että edullisimmat kuivaustulokset saadaan algoritmilla 1, joka pyrki maksimoimaan kuivauksen taloudellisen hyödyn. Myöhemmässä vaiheessa, varsinkin vuonna 2018 koeajot tehtiin käyttäen vain algoritmia 1. Tulosten tarkastelussa ei otettu erikseen huomioon mahdollista algoritmiohjauksen vaikutusta, koska jokainen koeajo oli säätilaltaan ja kestoiltaan erilainen, joten algoritmin vaikutusta oli mahdoton eritellä yksiselitteisesti.

Kuivauskokeiden jälkeen hakkeen kuivauksen kannattavuutta tarkasteltiin mitatun auringonsäteilyn, haihdutetun vesimäärän sekä kustannus- ja hyötylaskelmien perusteella. Kuivauksen kannattavuus - hake-erän arvon lisäys vähennettynä sähkökustannuksilla - määritettiin kokeiden aikana vaakasuoralle pinnalle tulleen auringonsäteilyn funktiona. Jotta koko kuivaussysteemin kannattavuutta voitiin arvioida käytännön mittakaavassa ja vuositasolla, tulokset ekstrapoloitiin vuodessa saatavilla olevan auringonsäteilyn suhteen. Tulokset skaalattiin kahteen kokoluokkaan, eli sisältämään joko 90 m² (maatilakokoluokka) tai 5000 m² (bioenergiaterminaali) aurinkokeräimiä.

Investointien osalta oletettiin, että maatilakuivuri rakennetaan olemassa olevaan rakennukseen kuten maatilan konehalliin tai latoon. Suuremman kokoluokan kuivuri laskettiin kuitenkin kokonaisuudessaan uusinwestointina, koska ei ole todennäköistä, että näin suurta rakennusta olisi valmiina tähän käyttöön. Lisäksi jälkimmäiseen investointiin lisättiin erillinen varastorakennus, sillä koko kuivattu hakemäärä ei mahdu kuivurin yhteyteen. Kaikkein suurin kustannus aiheutuu kuitenkin aurinkokeräimistä ja niiden asentamisesta. Yhteensä skaalattujen kuivureiden investointikustannukset arvioitiin olevan pienemmälle kuivurille 62 900 € (alv. 0%) ja suuremmalle 2 365 000 € (alv. 0%). Koska lämmön talteenotto paransi merkittävästi kuivauksen kannattavuutta, huomioitiin järjestelmän takaisinmaksuaikalaskennoissa ainoastaan tulokset, joissa lämmöntalteenotto oli asennettuna.

Mikäli lopputuotteen myyntihinta kasvaa kuivauksen ansiosta, on tienvarsikuivatusta rangasta tehdyn hakkeen kuivaus kannattavampaa kuin tuoreen hakkeen kuivaus. Kuivauksesta saatava arvon nousu haihdutettua vesikiloa kohden on huomattavasti suurempi tienvarsikuivan hakkeen tapauksessa. Laskelmassa ei huomioitu mahdollisia kuiva-ainetappioita tienvarsikuivauksessa eikä nopeutettua pääomien tuloutusta. Kuiva-ainetappioiden pieneneminen ja hyöty nopeammasta tuloutuksesta keinokuivauksen avulla parantaisi tuoreen hakkeen keinokuivauksen kannattavuutta.

Suoraan koedatan perusteella lasketut takaisinmaksuajat eivät ole kovin houkuttelevia yrittäjän näkökulmasta, sillä ne edellyttävät jopa useiden kymmenien vuosien takaisinmaksuaikoja. Suurimmalla järjestelmällä saavutetaan lyhimmat takaisinmaksuajat. Erityisen mielenkiintoisia ovat 6 m² keräinalalla tehdyistä kokeista skaalatut tulokset. Koska 6 m² keräinala heikensi käyttökatetta vain vähän verrattuna 12 m² keräinalaan, tuon datan skaalaus 5000 m² kokoluokkaan johtaa lyhimpään takaisinmaksu-aikaan. Tulos indikoi sitä, että VTT:n koelaitteen aurinkolämpöjärjestelmä on tarpeettoman suuri suhteutettuna kuivurin kapasiteettiin ja 6 m² keräinalalla kannattaisi tehdä lisää kokeita johtopäätösten varmentamiseksi.

Kuivauskokeissa kuivauksen tehokkuus oli parhaimmillaan noin 70 % suhteessa vaakatasolle kertyneeseen säteilyyn. Siksi voidaan olettaa tähän päästävän myös käytännössä. Uusiutuvan energian investointeihin on usein saatavilla investointitukia, varsinkin maaseudulla. Lisäksi koetuloksista poiketen sähkönhinta voi tulevaisuudessa kesäaikaan olla selvästi alle laskennoissa käytetyn 110 €/MWh. Nämä seikat huomioiden aurinkojärjestelmän hyödyntäminen biomassan kuivauksessa tulee huomattavasti kilpailukykyisemmäksi.

Johtopäätökset kuivauskokeista:

- Suomessa aurinkokeräimien vuotuinen potentiaalinen hyödyntämisaika kestää noin seitsemän kuukautta, maaliskuusta syyskuuhun. Keski-Suomessa tänä aikana keskimääräinen säteily vaakasuoralle pinnalle on 830 kWh neliometriä kohden. Vastaavasti 45° kulmaan ja etelään suunnatuille keräimille se on noin 1 050 kWh neliometriä kohti.
- Aurinkokeräinten avulla tapahtuva kuivaus, kuten kylmäilmakuivaus, on hyvin sääriippuvaista ja vuosittaiset vaihtelut ovat suuria.
- Noin 100 irtokuutiota lämmitykseen käyttävän maatilan koko hakemäärä voitaisiin hyvin kuivata lämminilmakuivurilla, johon on liitetty lämmönlähteeksi 90 m² aurinkokeräimiä.
- Kuivureiden laskennalliset takaisinmaksuajat eivät ole kovin houkuttelevia yrittäjän näkökulmasta ilman tukia johtuen järjestelmän suuresta investointikustannuksesta ja rajoitetusta vuosittaisesta käyttöajasta.
- Seuraavilla oletamuksilla, verrattuna hankkeen koetuloksiin, voitaisiin skaalattua aurinkolämpöjärjestelmää hyödyntää kuivauksessa kohtuullisin takaisinmaksujajoin (10-20 vuotta):
 - Hyödynnettäisiin aluksi luonnonkuivausta rankojen tienvarsivarastossa, loppu kuivaus kuivurissa
 - Kuivatun hakkeen lisäarvoksi lasketaan vähintään 2 €/MWh (hakkeen hinta 21 €/MWh → 23 €/MWh)
 - Investoinneille saadaan 30 % investointituki
 - Kuivausjärjestelmän kuivauksen tehokkuus on vähintään 70 % vaakatasolle kertyvästä säteilyenergiasta verrattuna koekuivurin 40 % hyötysuhteeseen

6.3 Lämpölaitoksen kesäajan lämmöntuotanto

Laskennallisesti arvioitiin, kannattaako pieni alle 1 MW lämpölaitos sulkea kesäajaksi ja tuottaa asiakkaille lämpö joko aurinkokeräimillä tai lämpöpumpulla. Niiden kustannuksia verrattiin seurannassa olleen Äänekosken energian Hirvaskankaan 1 MW laitoksen kesäajan lämmöntuotantokustannuksiin. Vertailun oleelliset johtopäätökset ovat:

- Kesäaikana tyypillisten lämpöyrittäjävetoisten lämpölaitosten lämmöntuotanto jää hyvin alhaiselle tasolle (alle 15 % talven huippukuormasta seurantakattilalla). Huolto- ja häiriökustannuksista johtuen kesällä lämmön tuottaminen on kallista (46 €/tuotettu MWh seurantajaksolla).
- Aurinkolämpöjärjestelmä voitaisiin teknisesti toteuttaa tuottamaan lämpöä kesäaikaan, mutta taloudellinen kannattavuus verrattuna olemassa olevaan hakekattilaan jää

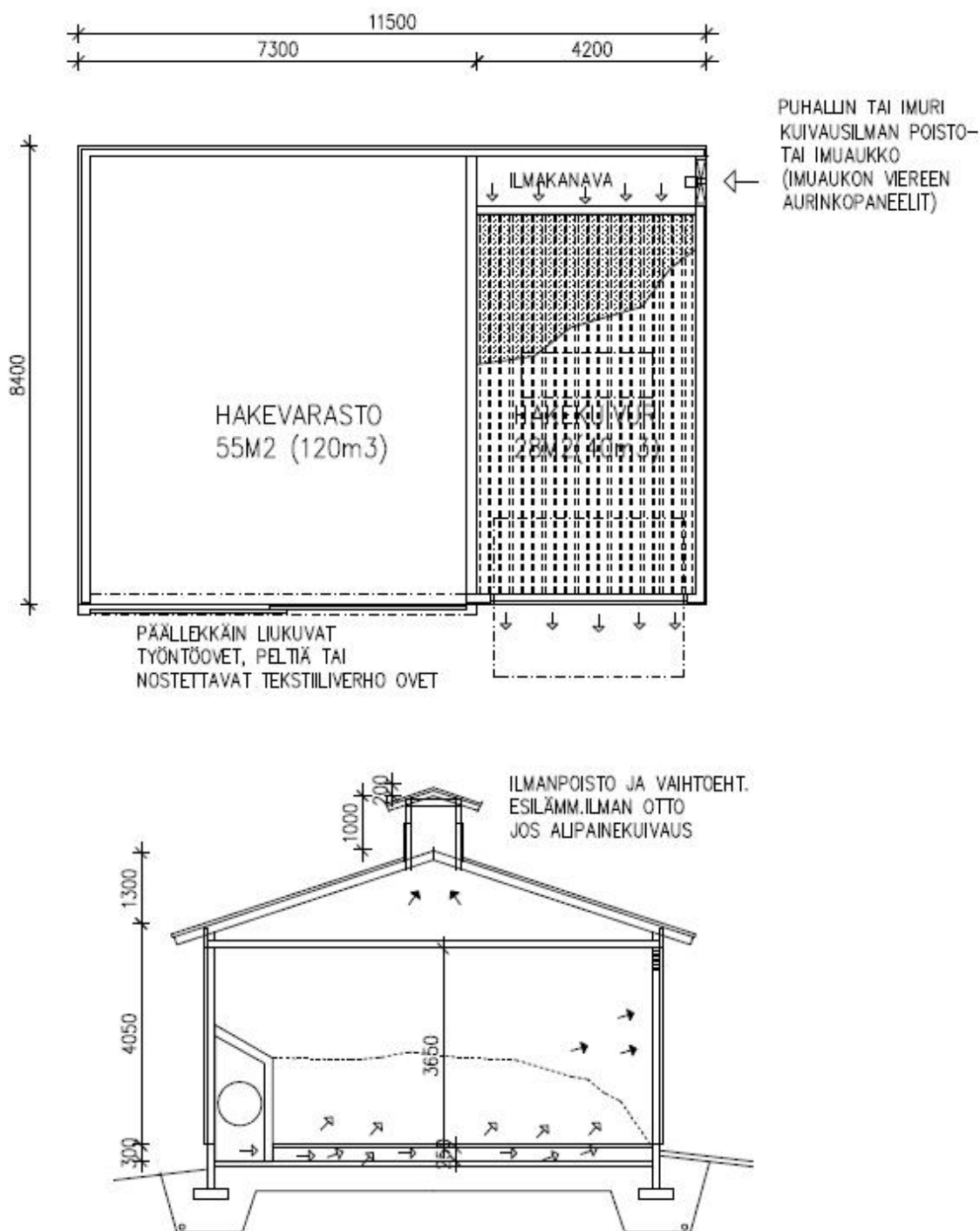
heikoksi. Tämä johtuu lähinnä aurinkolämpöjärjestelmän merkittävästä investointikustannuksesta ja tuotannon vaihtelevan luonteen aiheuttamasta varastointi- tai säätötarpeesta.

- Kesäajan käyttöä ajatellen ilma-vesilämpöpumppu olisi investoinniltaan selvästi maalämpöä edullisempi. Kyseisen aluelämpöverkon lämpötila on kuitenkin ilma-vesilämpöpumpulle haasteellisen korkea eikä helposti säädettävissä. Käytännössä edullisia sähkön hintoja ja lämpöpumpun (COP-kertoimen) kannalta suotuisia olosuhteita pitäisi olla samaan aikaan tuhansia tunteja vuosittain, jotta investointi kannattaisi.

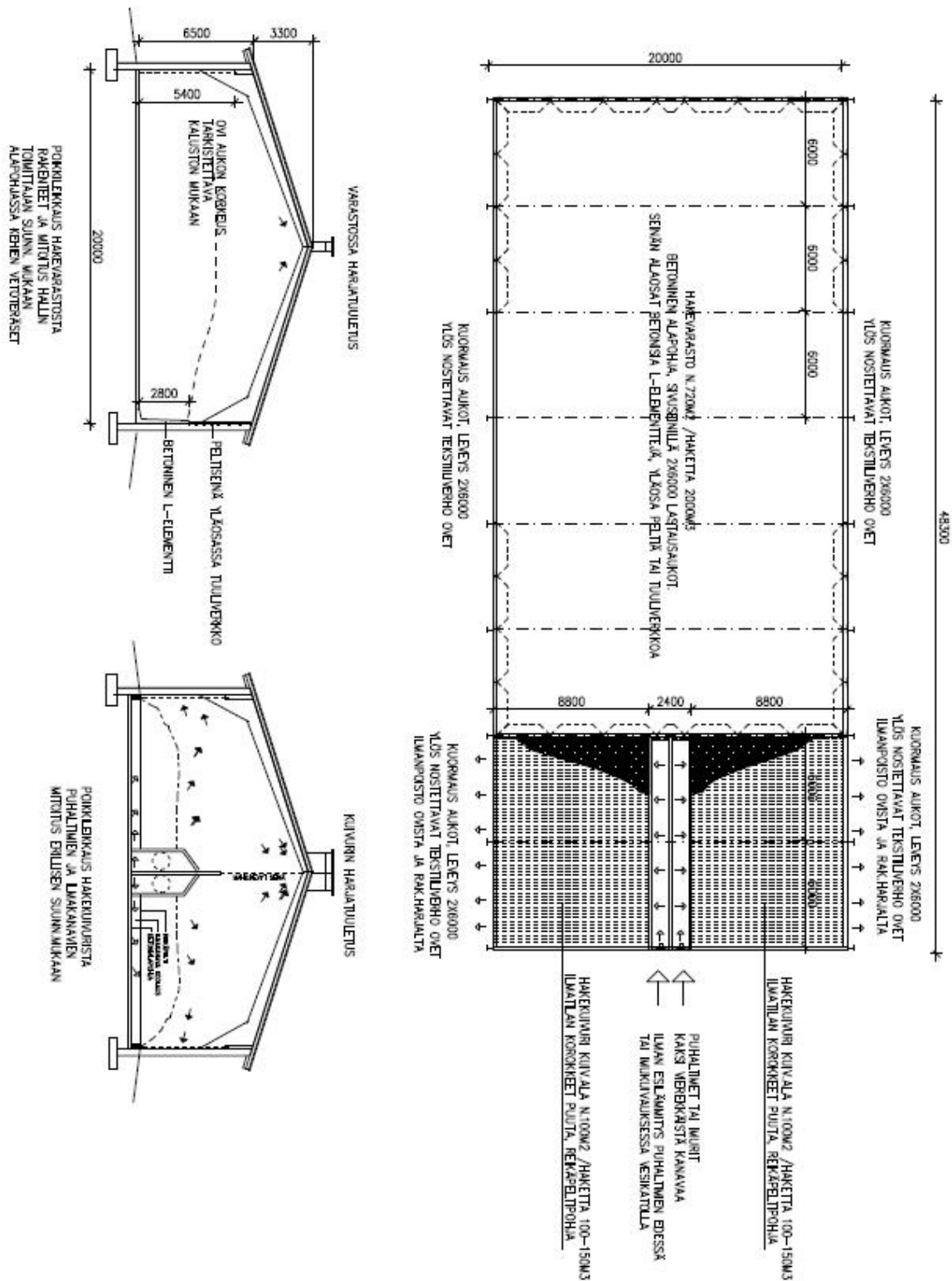
Lähdeviitteet

- Erat, B., Erkkilä, V., Nyman, C., Peippo, K., Peltola, S. & Suokivi, H. 2008. Aurinko-opas, aurinkoenergiaa rakennuksiin. Porvoo: Aurinkoteknillinen yhdistys ry.
- Erkkilä, A., Hillebrand, K., Impola, R., Kallio, M. & Saastamoinen, J. 2010. Metsäraaka-aineen haketus ja palakoon merkitys kuivumiseen puupellettien tuotantoketjussa. Jyväskylä: VTT-R-00801-10. Asiakasraportti.
- Heimonen, I. 2011. Aurinko-opas 2012. Aurinkolämmön ja -sähkön energiantuoton laskennan opas. Helsinki: Sitra.
- Holmberg, H. & Ramm-Schmidt, L. 2015. Kuivatus- ja haihdutusprosessit teollisuudessa. Kuivaus- ja haihdutusluennot. Ene-59.4130. Helsinki: Aalto yliopisto.
- Hukka, A. 1996. Puun kuivumisen matemaattinen mallintaminen korkeissa lämpötiloissa. Espoo: VTT:n julkaisuja 815. VTT rakennustekniikka.
- Härkönen, M. 2012. Puun polttoainekäyttö pienissä aluelämpölaitoksissa. Kokkola: Centria tutkimus ja kehitys. Keski-Pohjanmaan ammattikorkeakoulu.
- JRC. 2017. Photovoltaic Geographical Information System - Interactive Maps. <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php#>
- Keski-Mattinen, V. 2018. Pro Agrialta tilatut havainnekuvat kuivureista ja niiden keskimääräiset rakennuskustannukset perustuen MMM:n suosituksiin.
- Kiianmies, M. 2014. Sahatavaran sivutuotteiden jalostusarvon nostaminen kuivaamalla. Opinnäytetyö. Kotka: Kymenlaakson ammattikorkeakoulu, Puutekniikan koulutusohjelma.
- Knuuttila, K. 2003. Puuenergia, Jyväskylä: Gummerus kirjapaino Oy.
- Linna, V., Kaipainen, H. & Okkonen, J. 1983. Aurinkolämmön käyttö hakkeen ja palaturpeen puhallinkuivauksessa. Espoo: VTT tutkimuksia 239. Kotimaisten polttoaineiden laboratorio.
- Nasdaq. 2017. Nasdaq Commodities - Market prices. Realised prices of market: Electricity Nordic. Available at <http://www.nasdaqomx.com/commodities/market-prices> (cited 5.12.2017)
- Raitila, J., Virkkunen, M. & Heiskanen, V-P. 2014. Metsäpolttoaineiden varastoitavuus runkoina ja hakkeena sekä lämmöntuotantoon integroitu metsäpolttoaineen kuivaus. Tutkimusraportti VTT-R-04524-14.
- Sipi, M. 2006. Sahatavaratuotanto Helsinki: Opetushallitus.
- Viirimäki, J. (ed.) 2008. Maatilan hakelämmitysopas. Lahti: Suomen Metsäkeskus.
- Viita, T. 2013. Viljankuivauksen energiatehokkuuden selvittäminen simuloimalla. Maisteritutkielma. Helsinki: Helsingin yliopisto, Maataloustieteiden laitos, Maatalousteknologia.
- Åman, J. 2015. Aurinkoenergian mahdollisuudet Suomessa syys-, talvi- ja kevätolosuhteissa. Insinööriö. Espoo: Metropolia Ammattikorkeakoulu, Talotekniikan tutkinto-ohjelma.

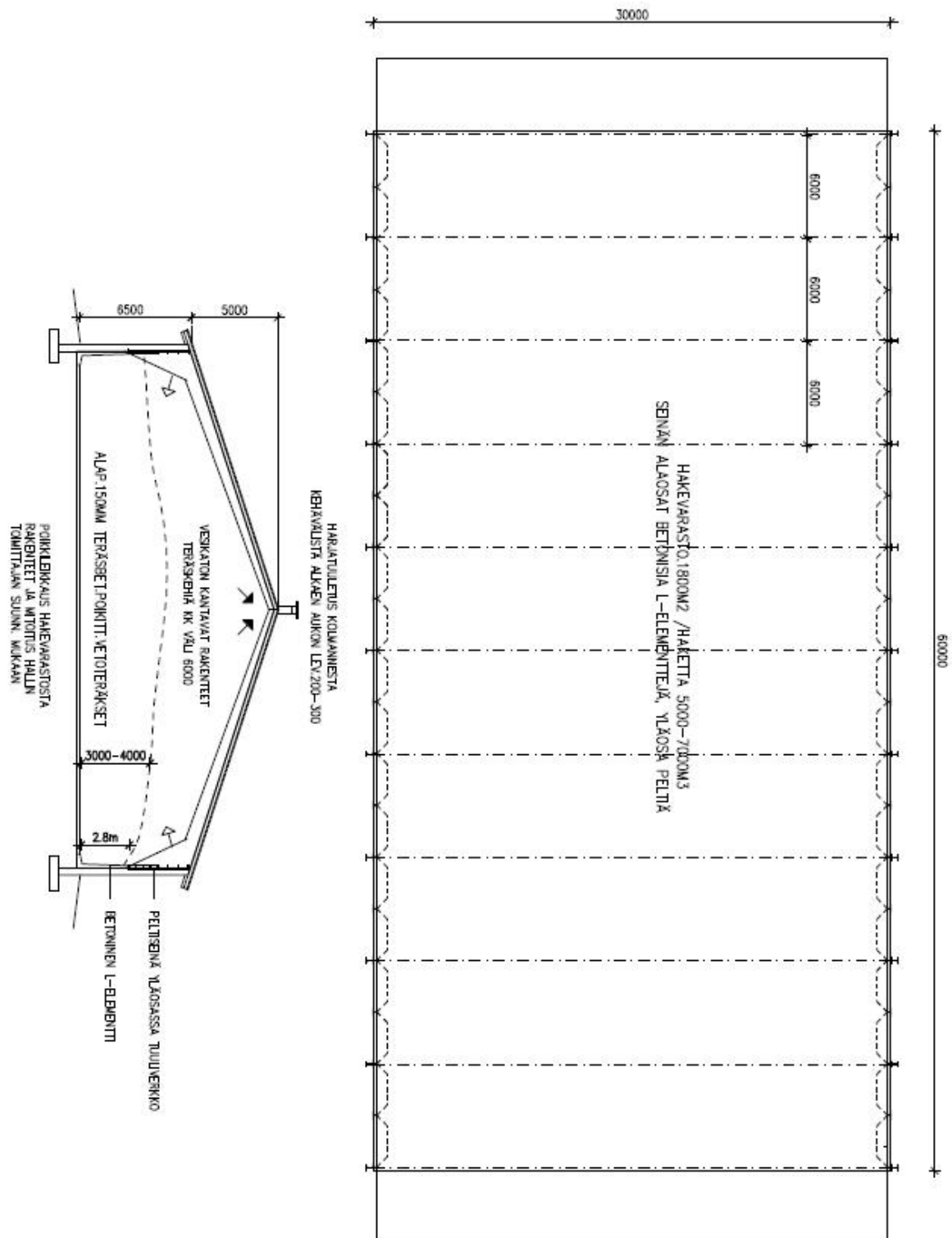
Liitteet



Kuva L1. Maatilalle soveltuva hakekuivuri, johon voidaan yhdistää aurinkokeräimet. Mitoitettu maksimissaan 140 hakekuutiometrin kuivaukseen ja varastointiin.



Kuva L2. Terminaaliin tai kuivausyriykselle mitoitettu hakekuivuri (maks. 7500 hakekuutiota/v).



Kuva L3. Varastorakennus suuren (5000-7000 hakekuutiota) hakemäärän varastointiin.